

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HIBRIDO
EÓLICO/FOTOVOLTAICO PARA ALUMBRADO PÚBLICO
EN VÍAS RÁPIDAS. CASO DE ESTUDIO VÍA CUENCA –
AZOGUES**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

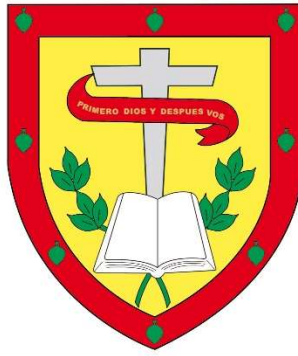
AUTOR: CHRISTIAN MAURICIO PEÑAFIEL MOROCHO

DIRECTOR: ING. DANIEL ICAZA ÁLVAREZ, PHD

CUENCA - ECUADOR

2024

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN.**

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HIBRIDO
EÓLICO/FOTOVOLTAICO PARA ALUMBRADO PÚBLICO EN VÍAS
RÁPIDAS. CASO DE ESTUDIO VÍA CUENCA – AZOGUES
PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO.**

AUTOR: CHRISTIAN MAURICIO PEÑAFIEL MOROCHO

DIRECTOR: ING. DANIEL ICAZA ÁLVAREZ, PHD

CUENCA - ECUADOR

2024

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Christian Mauricio Peñafiel Morocho portador de la cedula de ciudadanía N.º 0104720776. Declaro ser el autor de la obra: Diseño y simulación de un sistema híbrido eólico/fotovoltaico para alumbrado público en vías rápidas. Caso de estudio vía Cuenca – Azogues, sobre el cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 12 de agosto de 2024



Christian Mauricio Peñafiel Morocho

0104720776

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Christian Mauricio Peñafiel Morocho, bajo mi supervisión.



Ing. Daniel Icaza Álvarez. PHD.

DIRECTOR

DEDICATORIA

Dedico con todo mi corazón mi tesis a mi madre Maricela por su amor incondicional, apoyo constante, por su sacrificio y por darme la oportunidad de alcanzar mis sueños, pues sin ella no lo habría logrado. Su bendición a lo largo de mi vida me protege y me conlleva a ser mejor cada día; por eso este trabajo es tributo a su paciencia, amor y fe; le amo madre mía. A mi hermana Lourdes, por su complicidad, ánimo inquebrantable y palabras de aliento en los momentos más desafiantes, su presencia ha sido mi roca en medio de la tormenta. A mi familia, por su comprensión, paciencia y ánimo en los momentos difíciles siendo un pilar fundamental en mi vida académica. Por último, a mis profesores, por su sabiduría, guía y enseñanzas que han marcado mi camino académico y a todos aquellos que, de una manera u otra, contribuyeron a la realización de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primero a Dios, sin él nada de esto hubiese sido posible. A mi tutor el Ing. Daniel Icaza Álvarez, quien me supo compartir sus conocimientos, su invaluable orientación, guía y apoyo al momento de desarrollar este proyecto de titulación, que gracias a su dedicación y compromiso han hecho posible este logro académico. A mi amigo Otto, por su compañía, alegría y motivación que me impulsaron a seguir adelante en los momentos de estudio, risas y siendo un alivio en medio de la presión académica.

RESUMEN

El proyecto "Diseño y simulación de un sistema híbrido eólico/fotovoltaico para alumbrado público en vías rápidas, con un caso de estudio en la vía Cuenca – Azogues" aborda la problemática de los cortes de energía en Ecuador debido a su dependencia de la energía hidroeléctrica. La investigación busca desarrollar una solución energética sostenible que garantice un suministro eléctrico estable y diversificado. El diseño de un sistema híbrido eólico/fotovoltaico se justifica por su capacidad para mejorar la estabilidad energética y reducir las emisiones de carbono, beneficiando tanto al medio ambiente como a la economía. El objetivo general es diseñar y simular un sistema híbrido eficiente para el alumbrado público. Se trata de un estudio descriptivo y experimental, centrado en la vía Cuenca – Azogues. La población estudiada incluye las luminarias LED instaladas en dicha vía, con una muestra de 1890 luminarias. Se espera que los resultados validen la viabilidad técnica del sistema propuesto, proporcionando una solución replicable en otras regiones.

Palabras clave: energía renovable, sistema híbrido, sistema eólico, sistema fotovoltaico, alumbrado público.

ABSTRACT

The project "Design and Simulation of a Hybrid Wind/Photovoltaic System for Public Lighting on Highways, with a Case Study on the Cuenca-Azogues Road" addresses the problem of power outages in Ecuador due to its dependence on hydroelectric power. The research aims to develop a sustainable energy solution that ensures a stable and diversified electricity supply. The design of a hybrid wind/photovoltaic system is justified by its ability to improve energy stability and reduce carbon emissions, benefiting both the environment and the economy. The objective is to design and simulate an efficient hybrid system for street lighting. This descriptive and experimental study focused on the Cuenca - Azogues road. The studied population includes the LED luminaires installed on this road, with a sample of 1,890 luminaires. The results are expected to validate the technical feasibility of the proposed system, providing a replicable solution in other regions.

Keywords: renewable energy, hybrid system, wind system, photovoltaic system, street lighting

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABLAS.....	xv
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCION.....	1
1.1 Formulación del problema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Alcance.....	3
1.4 Justificación	4
CAPÍTULO 2	5
2 Motivación y contexto	5
2.1 Metodología.....	6
2.1.1 Diseño metodológico.....	6
2.1.2 Caracterización del sistema híbrido eólico/fotovoltaico	8
2.1.3 Arquitectura sistema Híbrido Eólico/Fotovoltaico	10
2.2 Fundamentación Teórica	11
2.3 Estado del arte.....	12
2.4 Alumbrado público en carreteras	21
2.5 Sistema de generación fotovoltaico	22
2.5.1 Espectro de radiación	23
2.5.2 Recurso solar.....	24
2.5.3 Hora pico solar.....	26
2.6 Tipos de sistema de generación fotovoltaica.....	27

2.6.1	Sistemas fotovoltaicos fuera de la red.....	28
2.6.2	Sistemas fotovoltaicos híbridos.....	30
2.6.3	Sistemas solares fotovoltaicos distribuidos	31
2.7	Componentes del sistema solar fotovoltaico	32
2.7.1	Módulos solares.....	33
2.7.2	Baterías	34
2.7.3	Baterías en sistemas fotovoltaicos independientes	35
2.7.4	Baterías en sistemas fotovoltaicos híbridos	36
2.7.5	Parámetros de la batería.....	36
2.8	Sistema de generación eólica.....	44
CAPÍTULO 3		48
3	MODELADO MATEMÁTICO	48
3.1	Análisis de la generación de energía fotovoltaica	48
3.2	Análisis de la generación de energía de la turbina eólica.....	50
3.3	ANÁLISIS DE POTENCIAL EÓLICO	51
3.3.1	Zona de estudio.	51
3.4	Caracterización de carga	52
3.5	Energía consumida asociada a la carga	52
3.6	Caracterización del recurso eólico y solar.....	54
3.6.1.	Análisis del recurso eólico.....	54
3.6.2.	Análisis del recurso eólico anual	55
3.6.3.	Análisis del recurso eólico mensual	57
3.6.4.	Análisis del recurso eólico diario	59
3.6.5.	Análisis estadístico para recurso eólico de la vía cuenca – azogues.....	61
3.6.6.	Análisis del recurso solar	65
3.7	Selección de generador eólico.....	67
3.7.1.	Cálculo de potencia y energía generada.....	69
3.7.2.	Cálculo del Área Barrida	70

3.7.3.	Velocidad del Viento	70
3.7.4.	Coeficiente de Potencia	70
3.7.5.	Cálculo de la Potencia	70
3.7.6.	Energía Anual Generada	71
3.8	Selección de panel fotovoltaico.....	71
3.8.1.	Cálculo de la potencia y energía generada	74
3.8.2.	Cálculo de la Energía Diaria Generada.....	74
3.8.3.	Cálculo de la energía anual generada.....	74
3.9	Dimensionamiento del sistema de almacenamiento.....	75
4	CAPÍTULO 4	77
4.1	Análisis de la vía cuenca-azogues con DIALux.....	77
4.2	Potencial de Captación de Energía Solar.....	78
4.3	Potencial de aprovechamiento de Energía eólica	80
4.3.1	Análisis con vehículo a 80km/h	80
4.3.2	Análisis con vehículo a 100km/h	81
4.3.3	Análisis con vehículo a 120km/h	83
4.4	Análisis de fuerzas.....	84
4.5	Análisis de tráfico.....	87
4.6	Producción de energía estimada por zona.....	89
5	CONCLUSIONES.....	93
6	RECOMENDACIONES.....	94
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología propuesta para la investigación	8
Figura 2. Componentes del sistema híbrido	9
Figura 3. Arquitectura del sistema híbrido	11
Figura 4. Espectro solar de radiación	23
Figura 5. Interacción de la radiación	25
Figura 6. Potencial fotovoltaico mundial	26
Figura 7. Irradiación normal directa global	26
Figura 8. Irradiación horizontal global	26
Figura 9. Variación de la irradiancia solar a lo largo del día	27
Figura 10. Sistema fotovoltaico fuera de la red	29
Figura 11. Sistema fotovoltaico híbrido	31
Figura 12. Estación meteorológica alimentada por energía solar fotovoltaica	32
Figura 13. Diagrama esquemático de panel solar, cadena, módulo y celda.	33
Figura 14. Sistema solar fotovoltaico aislado de la red con almacenamiento de batería.	35
Figura 15. Curva de descarga comparativa de baterías LA y Li-ion. El voltaje de la batería disminuye con el aumento de DOD.....	37
Figura 16. Relación inversa entre el SoC y el DoD de una batería.....	38
Figura 17. Relación entre capacidad de la batería, profundidad de descarga y ciclo de vida.	41
Figura 18. Conversión de energía mecánica a eléctrica.....	44
Figura 19. Aerogeneradores de eje horizontal	45
Figura 20. Aerogenerador Darrieus.....	46
Figura 21. Aerogeneradores Savonius.....	46
Figura 22. Aerogenerador híbrido de eje vertical.....	47
Figura 23. Carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.....	51
Figura 24. Delimitación de caso de estudio. Carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.	55

Figura 25. Comportamiento del viento por año en carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.....	56
Figura 26. Comportamiento del viento por mes en carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.....	58
Figura 27. Comportamiento del viento diario en carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.....	60
Figura 28. Distribución de densidad de Weibull en carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.....	64
Figura 29. Ubicación de punto para evaluar el recurso solar en la carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.	65
Figura 30. Simulación en DIALux, carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.....	77
Figura 31. Radiación mensual en el punto de estudio, carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.....	78
Figura 32. Generación de energía del módulo solar del recolector de energía propuesto en cada mes.....	79
Figura 33. Comportamiento del viento ante el paso de un vehículo que circula a 80 km/h – Paneles cerrados.....	80
Figura 34. Comportamiento del viento ante el paso de un vehículo que circula a 80 km/h – Paneles abiertos.....	81
Figura 35. Comportamiento del viento ante el paso de un vehículo que circula a 100 km/h – Paneles cerrados.....	82
Figura 36. Comportamiento del viento ante el paso de un vehículo que circula a 100 km/h – Paneles abiertos.....	82
Figura 37. Comportamiento del viento ante el paso de un vehículo que circula a 120 km/h – Paneles cerrados.....	83
Figura 38. Comportamiento del viento ante el paso de un vehículo que circula a 120 km/h – Paneles abiertos.....	84
Figura 39. Comportamiento de velocidad y fuerza aplicada al aerogenerador, ante circulación de un vehículo a 80km/h.....	85
Figura 40. Comportamiento de velocidad y fuerza aplicada al aerogenerador, ante circulación de un vehículo a 100 km/h.....	86

Figura 41. Comportamiento de velocidad y fuerza aplicada al aerogenerador, ante circulación de un vehículo a 120 km/h	87
Figura 42. Trafico medio diario en la autopista Cuenca - Azogues.....	88
Figura 43. Horas de trabajo y generación de energía eólica en la autopista Cuenca – Azogues.....	88
Figura 43. Generación total de energía de tecnología hibrida fotovoltaica/eólica en autopista cuenca azogues.....	89
Figura 45. Potencial estimado de generación de tecnología hibrida fotovoltaica/eólica en autopista cuenca azogues	91
Figura 46. Estimación de generación tecnología hibrida fotovoltaica/eólica en autopista cuenca azogues.....	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de elementos relevantes de estado del arte.....	18
Tabla 2. Coordenadas Geográficas de la Zona de Estudio.....	52
Tabla 3. Energía consumida asociada a la carga – sistema de iluminación Cuenca - Azogues.....	53
Tabla 4. Análisis del comportamiento del viento por año – autopista Cuenca - Azogues.....	56
Tabla 5. Análisis del comportamiento del viento por mes – autopista Cuenca - Azogues.....	59
Tabla 6. Análisis del comportamiento del viento por día – autopista Cuenca - Azogues.....	61
Tabla 7. Datos anuales de velocidad del viento en la autopista Cuenca - Azogues.....	62
Tabla 8. Cómputo de parámetros de Weibull para velocidad del viento en la autopista Cuenca - Azogues	63
Tabla 9. Recurso solar en la autopista Cuenca - Azogues	66
Tabla 10. Selección de generador eólico para iluminación en la autopista Cuenca - Azogues	68
Tabla 11. Características de turbina eólica seleccionada.	69
Tabla 12. Selección de panel fotovoltaico para iluminación en la autopista Cuenca - Azogues	72
Tabla 13. Características Técnicas del Panel First Light BFL Series	73

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCION

El proyecto "Diseño y simulación de un sistema híbrido eólico/fotovoltaico para alumbrado público en vías rápidas, con un caso de estudio en la vía Cuenca – Azogues" tiene como objetivo principal desarrollar una solución energética sostenible para el alumbrado público en Ecuador. Este proyecto se presenta como una respuesta crucial a la problemática actual de cortes de energía eléctrica que afecta al país, impactando negativamente en la vida diaria y la economía (Primicias, 2024).

La dependencia de Ecuador de la energía hidroeléctrica lo hace vulnerable a las variaciones climáticas, como la sequía, que generan crisis energéticas. Estas crisis afectan a los servicios básicos, incluyendo el alumbrado público, y a la operatividad de las empresas (Vistazo, 2024).

La implementación de un sistema híbrido eólico/fotovoltaico surge como una alternativa viable y sostenible para el alumbrado público. Este sistema no solo aportaría estabilidad al suministro eléctrico de la región, sino que también diversificaría las fuentes de energía del país, reduciendo su vulnerabilidad ante las fluctuaciones de una sola fuente (CELEC, 2023).

El diseño y simulación de este sistema impulsaría el desarrollo y aplicación de tecnologías innovadoras en el ámbito de las energías renovables. Esto posicionaría a Ecuador como un líder en la adopción de soluciones energéticas sostenibles y avanzadas.

Adicionalmente, la implementación de un sistema de alumbrado eficiente y confiable en la vía Cuenca - Azogues mejoraría la seguridad vial. Este es un aspecto crucial en zonas donde los cortes de energía pueden dejar a sectores críticos sin iluminación.

1.1 Formulación del problema

Los cortes de energía eléctrica en Ecuador se han convertido en una problemática compleja, afectando diversos aspectos de la vida diaria y la economía del país. Esta situación se debe principalmente a la dependencia del país de la energía hidroeléctrica, que es vulnerable a variaciones climáticas como la sequía (Primicias, 2024). La crisis energética ha sido exacerbada por la falta de infraestructura alternativa y problemas de gestión, generando un impacto significativo en los servicios básicos y en la operatividad de las empresas. Aunque se han implementado medidas temporales como campañas de ahorro de energía y la suspensión de cortes, la situación destaca la necesidad de una planificación energética a largo plazo, incluyendo la diversificación de fuentes de energía y mejoras en la infraestructura, para asegurar un suministro estable y sostenible (Vistazo, 2024).

Ecuador ha enfrentado cortes de energía, en parte debido a su dependencia de la energía hidroeléctrica, que es vulnerable a las variaciones climáticas como las sequías. En este escenario, la implementación de un sistema híbrido eólico/fotovoltaico para el alumbrado público surge como una solución viable y sostenible. Dicho sistema no solo aportará estabilidad al suministro eléctrico de la región, sino que también diversificará las fuentes de energía del país, reduciendo así la vulnerabilidad ante las fluctuaciones de una sola fuente energética y disminuyendo los riesgos asociados a los cortes de energía.

La viabilidad de la energía eólica y fotovoltaica en Ecuador ya se ha demostrado mediante proyectos como el parque eólico Minas de Huascachaca y la Central Eólica Villonaco, ambos en la provincia de Loja. Estos proyectos subrayan el potencial eólico del país para generar energía limpia y renovable, proporcionando un precedente valioso para futuras implementaciones (CELEC, 2023; ElecAustro, 2022).

La introducción de un sistema de alumbrado público autónomo basado en energías renovables en la vía Cuenca - Azogues asegura que esta infraestructura crítica no se vea comprometida por posibles cortes en la red eléctrica nacional. Este proyecto, por lo tanto, alinea a Ecuador con los objetivos globales de sostenibilidad y reducción de emisiones de carbono.

El diseño y simulación de este sistema propiciarán el desarrollo y aplicación de tecnologías innovadoras en el ámbito de las energías renovables, posicionando a Ecuador como un líder en la adopción de soluciones energéticas sostenibles y avanzadas. Además, la implementación de un sistema de alumbrado eficiente y confiable en la vía Cuenca - Azogues mejorará la seguridad vial, un aspecto crucial en situaciones donde los cortes de energía pueden dejar a sectores críticos sin iluminación.

Este proyecto también tiene el potencial de servir como modelo para otras regiones en Ecuador, demostrando cómo las energías renovables pueden ofrecer una solución efectiva para mitigar los problemas relacionados con los cortes de energía en el alumbrado público.

1.2 Objetivos

Objetivo general

Diseñar un sistema híbrido eólico/fotovoltaico para alumbrado público en vías rápidas. Caso de estudio vía Cuenca – Azogues.

Objetivos específicos

- Determinar la carga energética de las luminarias en la zona designada de la vía Cuenca – Azogues.

- Realizar un análisis de las condiciones climáticas en la vía Cuenca – Azogues, centrado en la medición de la irradiancia solar y la velocidad del viento.
- Diseñar un sistema híbrido que combine de manera eficiente la energía eólica y fotovoltaica para el alumbrado público, usando un panel por luminaria.
- Realizar simulaciones para evaluar el rendimiento y la eficacia del sistema híbrido propuesto.

1.3 Alcance

El proyecto "Diseño y simulación de un sistema híbrido eólico/fotovoltaico para alumbrado público en vías rápidas, con un caso de estudio en la vía Cuenca – Azogues" abarca diversos aspectos cruciales para el desarrollo de una solución energética sostenible. En primer lugar, se determinará la carga energética de las luminarias en la zona designada de la vía Cuenca – Azogues, lo cual permitirá comprender los requerimientos energéticos específicos del sistema de alumbrado público, sentando las bases para el diseño del sistema híbrido.

Posteriormente, se realizará un análisis de las condiciones climáticas en la vía mencionada, con especial énfasis en la medición de la irradiancia solar y la velocidad del viento. Estos datos serán esenciales para evaluar el potencial de generación de energía a partir de fuentes renovables, como la energía solar fotovoltaica y la energía eólica. De esta manera, el análisis climático proporcionará información valiosa para el diseño óptimo del sistema híbrido.

Una vez recopilados los datos de carga energética y las condiciones climáticas, se procederá al diseño del sistema híbrido que combine de manera eficiente la energía eólica y fotovoltaica para el alumbrado público. Dicho diseño integrará las tecnologías más adecuadas para las condiciones de la vía Cuenca – Azogues, buscando maximizar la eficiencia y la efectividad del sistema. Finalmente, se realizarán simulaciones para evaluar el rendimiento y la eficiencia del sistema híbrido propuesto, validando así el diseño y sentando las bases para una posible implementación futura.

En consecuencia, el alcance de este proyecto abarca desde la determinación de la carga energética hasta la simulación del sistema híbrido, brindando un análisis completo y detallado de la viabilidad de una solución de alumbrado público basada en energías renovables. Por consiguiente, los resultados de este estudio servirán como referencia para futuras implementaciones en otras regiones de Ecuador, posicionando al país como un líder en la adopción de soluciones energéticas innovadoras y sostenibles.

1.4 Justificación

La dependencia de la energía hidroeléctrica y la falta de planificación a largo plazo han convertido a los cortes de energía eléctrica en Ecuador en una problemática compleja que afecta la vida diaria y la economía del país. Esta situación se ha visto exacerbada por la falta de infraestructura alternativa y problemas de gestión, impactando significativamente en los servicios básicos y la operatividad de las empresas.

Si bien se han implementado medidas temporales como campañas de ahorro de energía y la suspensión de cortes, estas no son soluciones sostenibles. Se requiere una planificación energética a largo plazo que incluya la diversificación de las fuentes de energía y la mejora de la infraestructura para asegurar un suministro estable y sostenible.

En este contexto, la introducción de un sistema de alumbrado público autónomo basado en energías renovables en la vía Cuenca - Azogues se presenta como una solución innovadora y efectiva. Este proyecto no solo asegura que esta infraestructura crítica no se vea comprometida por posibles cortes en la red eléctrica nacional, sino que también alinea a Ecuador con los objetivos globales de sostenibilidad y reducción de emisiones de carbono.

Además, la implementación de un sistema de alumbrado eficiente y confiable en la vía Cuenca - Azogues mejora la seguridad vial, un aspecto crucial en situaciones donde los cortes de energía pueden dejar a sectores críticos sin iluminación.

Este proyecto también tiene el potencial de servir como modelo para otras regiones en Ecuador. Demuestra cómo las energías renovables pueden ofrecer una solución efectiva para mitigar los problemas relacionados con los cortes de energía en el alumbrado público. La viabilidad de la energía eólica y fotovoltaica en Ecuador ya se ha demostrado mediante proyectos como el parque eólico Minas de Huascachaca y la Central Eólica Villonaco, ambos en la provincia de Loja, lo que subraya el potencial eólico del país para generar energía limpia y renovable.

CAPÍTULO 2

2 MOTIVACIÓN Y CONTEXTO

En el contexto actual, la adopción de energías renovables ha cobrado una relevancia sin precedentes debido a la creciente preocupación global por el cambio climático y la urgente necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El sector energético, particularmente en países en desarrollo como Ecuador, enfrenta el desafío de satisfacer una demanda eléctrica en constante aumento, mientras se promueve la sostenibilidad y la eficiencia energética. Este desafío es aún más crítico en áreas rurales y urbanas donde el acceso a una red eléctrica fiable es limitado. En este marco, la implementación de sistemas de energía renovable en infraestructuras públicas, como el alumbrado de autopistas, se presenta como una solución prometedoras y viable para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de carbono.

La motivación para enfocar la investigación en el uso de energías renovables, para el alumbrado público en autopistas, radica en varios factores clave. Primero, la energía solar y eólica son fuentes abundantes y renovables que pueden ser aprovechadas para proporcionar una iluminación sostenible y eficiente en áreas de alta demanda, como las autopistas. Estudios como los de Bangura et al. (2023) y Ali & Ammari (2022) han demostrado la viabilidad técnica y económica de los sistemas híbridos solar-eólicos, destacando su capacidad para generar un suministro energético estable. Asimismo, estos contribuyen a reducir significativamente los costos operativos y las emisiones de CO₂. Además, la tecnología LED, combinada con estos sistemas renovables, ha mostrado ser altamente eficiente en términos de ahorro energético y reducción de la contaminación lumínica, como se evidencia en los trabajos de Stoev & Matanov (2022).

En Ecuador, el enfoque en energías renovables, para el alumbrado público de autopistas, es particularmente pertinente. El país, con su riqueza en recursos solares y eólicos, tiene el potencial de liderar en la implementación de estas tecnologías, mejorando así la infraestructura energética y promoviendo la sostenibilidad. La investigación en este ámbito no solo contribuirá a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que, también promoverá el desarrollo económico y social al proporcionar una fuente de energía limpia y accesible. Este enfoque es importante para avanzar hacia los objetivos de desarrollo sostenible y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, al tiempo que se protege el medio ambiente. Por lo tanto, la investigación y el desarrollo en este campo son imperativos para asegurar un futuro energético sostenible y resiliente en Ecuador, así como, en otros países con desafíos similares.

2.1 Metodología

Los trabajos sobre análisis de viabilidad técnica y económica de los sistemas de iluminación vial fuera de la red, utilizando tecnologías: fotovoltaica (PV) y eólica, han proporcionado valiosas contribuciones a la literatura. Sin embargo, se observa que a menudo se descuidan los criterios de iluminación vial y se basan en suposiciones. Los estudios se concentran principalmente en la optimización del dimensionamiento de los sistemas PV, eólicos y de baterías, pero el costo total del sistema energético también depende del número de postes de iluminación a instalar, lo cual solo se puede determinar después de realizar cálculos de iluminación vial. Además, a diferencia de otras áreas de iluminación, el incumplimiento de los criterios de iluminación en la iluminación vial no solo reduce el confort del usuario, sino que también viola la seguridad vial y puede causar accidentes fatales, por lo que no debe ser negligido.

Dado que las luminarias LED son más eficientes en comparación con otras luminarias de la misma potencia, ofrecen un mayor nivel de iluminancia. No obstante, una suposición común en los estudios que puede resultar engañosa es dimensionar el sistema fotovoltaico, eólico y las baterías considerando un solo poste de iluminación. Este enfoque tiende a minimizar el tamaño y el costo del sistema en un único poste.

Además, los sistemas energéticos que se utilizarán para la iluminación vial fuera de la red deben dimensionarse según las peores condiciones de los meses de invierno para cumplir con los criterios de iluminación de manera ininterrumpida durante todo el año. En los meses de invierno, no solo hay un menor potencial solar y eólica, sino también un aumento en las horas de funcionamiento de la iluminación. Por lo tanto, también se deben determinar las horas de funcionamiento de la iluminación en lugar de utilizar valores promedio.

Por las razones mencionadas anteriormente, en este documento, se lleva a cabo un análisis técnico de los sistemas de iluminación vial LED fuera de la red utilizando tecnologías PV y eólica, considerando cálculos detallados de iluminación vial basados en los estándares internacionales y nacionales, lo cual es la principal contribución del estudio. Los cálculos de iluminación vial se realizan utilizando el software DIALux para las clases de iluminación vial M4 y M5 para obtener luminarias LED óptimas, tamaños de postes y espaciados.

2.1.1 Diseño metodológico

En consecuencia, la metodología para el presente proyecto se presenta en la Figura 1, donde se ilustra un enfoque integrado que combina los softwares DIALux y HOMER Pro. En primer lugar, DIALux se utiliza para determinar parámetros específicos de iluminación vial, como la altura y el espaciado óptimo de los postes, así como la luminaria LED adecuada. Esto

se basa en la clase de iluminación vial y el tipo de carretera. Este proceso genera un perfil de carga que refleja las horas de iluminación y la potencia LED requerida.

Posteriormente, HOMER Pro toma este perfil de carga junto con datos de entrada como la vida útil del sistema, los parámetros de costo, así como, los datos solares y eólicos proporcionados por la NASA. Con esta información, HOMER Pro calcula la producción de energía fotovoltaica (PV) y eólica, el consumo de carga, el tamaño óptimo del sistema PV, eólico y batería, el costo nivelado de la energía (COE) y el costo total neto (NPC). Por último, se estima el costo total de instalación sumando los costos de los postes de iluminación y del sistema de energía, multiplicados por el número de postes necesarios.

En la etapa final del procedimiento, se utiliza MATLAB para llevar a cabo un análisis minucioso con diversas entradas cruciales. Estas entradas incluyen los registros históricos de la velocidad del viento, la irradiancia solar, el perfil de carga del sistema, así como, las tecnologías eólicas y fotovoltaicas seleccionadas. Con estos datos, MATLAB es capaz de generar las curvas características correspondientes a cada tecnología empleada en la simulación, lo que permite una representación precisa del comportamiento energético del sistema.

Este método abarca desde la determinación de la carga energética y el análisis climático, hasta el diseño y la simulación del sistema híbrido, evaluando así la viabilidad de implementar una solución de alumbrado público sostenible en la vía Cuenca – Azogues. Por lo que, los resultados obtenidos pueden servir como referencia para futuros proyectos en Ecuador, promoviendo la adopción de tecnologías energéticas innovadoras y sostenibles en el país.

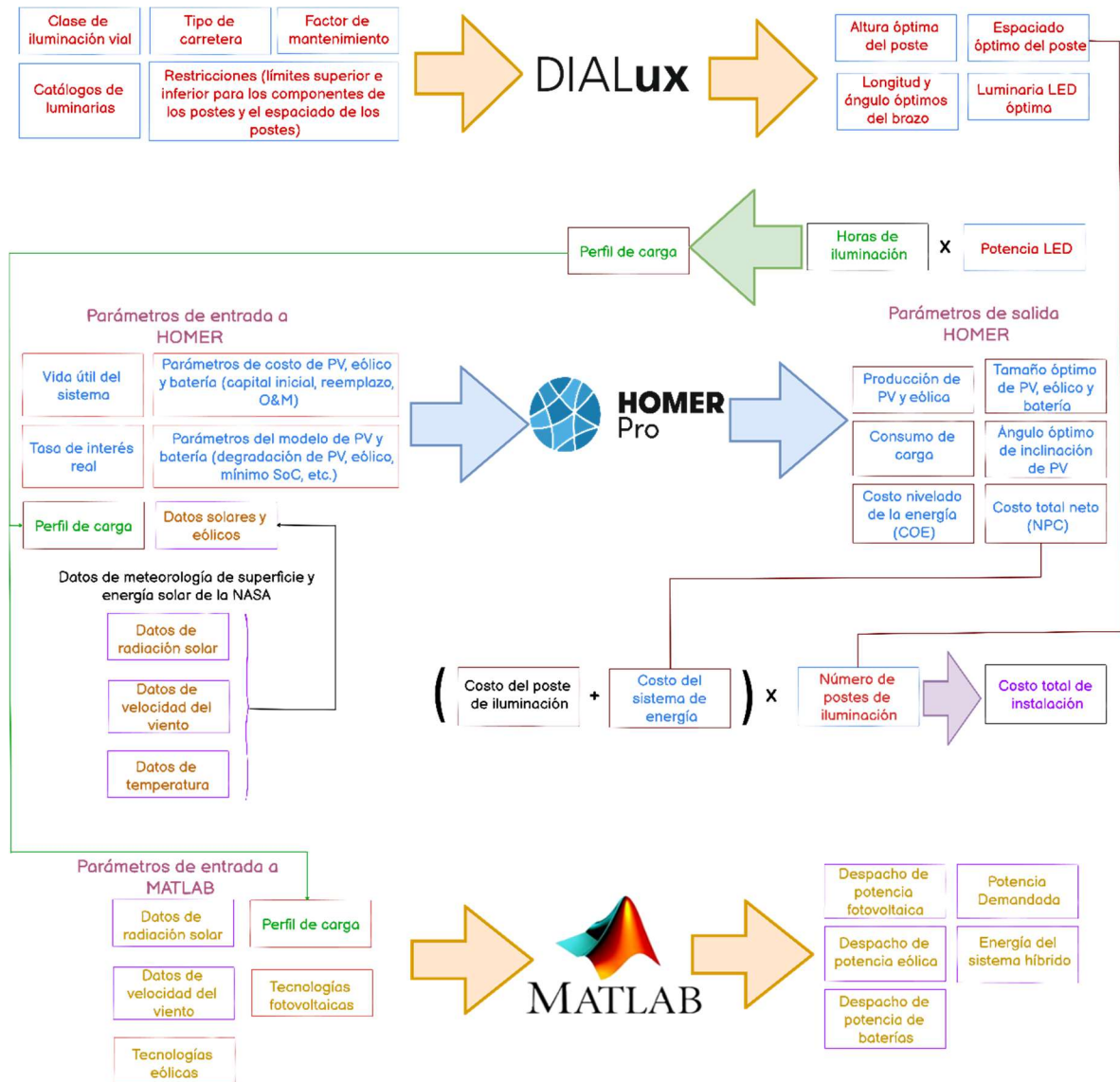


Figura 1. Metodología propuesta para la investigación

Fuente: Autor

2.1.2 Caracterización del sistema híbrido eólico/fotovoltaico

Esta sección explica los componentes del sistema híbrido eólico/fotovoltaico para alumbrado público en vías rápidas, con un caso de estudio en la vía Cuenca – Azogues. El sistema propuesto consta de una Turbina Eólica de Eje Vertical (VAWT), Deflectores Fotovoltaicos Flexibles (FPVD), dispositivos de conversión y componentes de almacenamiento de energía, con su esquema representado en la Figura 2. Las estructuras del VAWT y FPVD están integradas, y la acción combinada del FPVD y el VAWT describe un Mecanismo de Mejora del Flujo de Aire (AFEM).

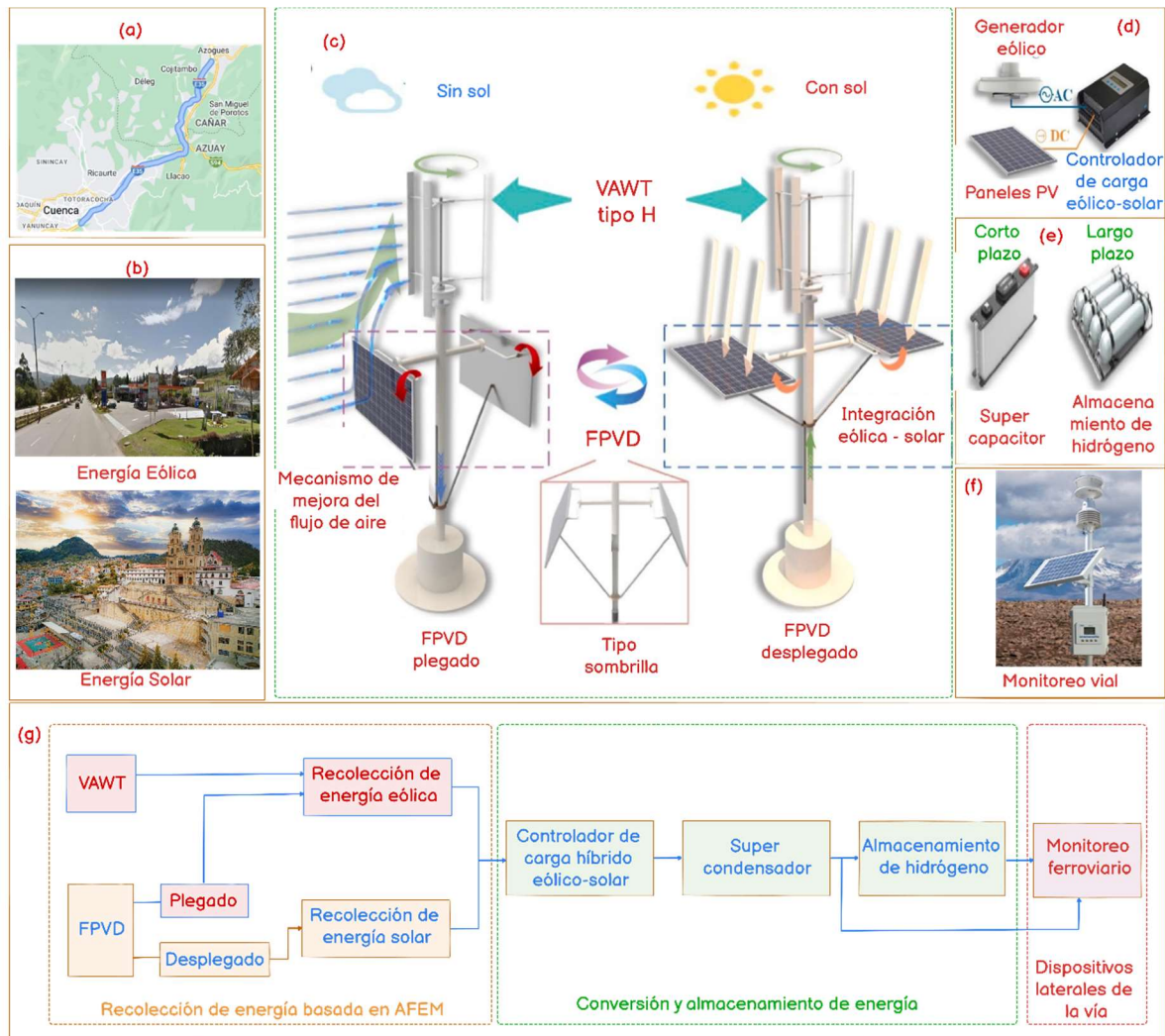


Figura 2. Componentes del sistema híbrido

Fuente: Autor

El AFEM optimiza la eficiencia de las turbinas eólicas mediante la redirección y aceleración del flujo de aire. Basado en el principio de Bernoulli, utiliza deflectores para aumentar la velocidad del viento que interactúa con el rotor. Al colocar obstáculos, el flujo de aire converge en una sección menor, incrementando su velocidad. Esto genera un mayor par positivo en el rotor, mejorando su arranque y eficiencia. En sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos, los deflectores también funcionan como paneles solares, maximizando el uso de energía renovable.

Como se muestra en la Figura 2(c), los dispositivos principales del sistema híbrido incluyen un VAWT tipo H diseñado para captar energía eólica y un par de FPVD dispuestos simétricamente. El FPVD combina paneles fotovoltaicos y deflectores, utilizando un mecanismo similar a un paraguas que se despliega para funcionar como un panel fotovoltaico,

el cual, capta energía solar o se pliega como un deflector para lograr el AFEM. Además, el mecanismo de plegado y despliegue simétrico, similar a un paraguas, puede expandirse en una forma cuadrilátera o poligonal para adaptarse a la omnidireccionalidad del VAWT.

Los generadores eólicos, las células solares y un controlador de carga complementario comprenden los dispositivos de conversión de energía. El VAWT impulsa el generador eólico para convertir la energía eólica en electricidad a través de corriente alterna trifásica, mientras que las células solares convierten la energía solar en electricidad a través de corriente continua. En la Figura 2(d), las diferentes formas de energía se transfieren al controlador de carga complementario, se filtran y rectifican en energía estable que puede almacenarse en dispositivos de almacenamiento de energía mostrados en la Figura 2(e). Estos dispositivos incluyen supercondensadores y dispositivos de almacenamiento de energía de hidrógeno para almacenamiento a corto y largo plazo, respectivamente. Por último, la energía almacenada se utiliza para alimentar las luminarias públicas, por ejemplo, la vía Cuenca – Azogues, garantizando así una iluminación eficiente y sostenible.

2.1.3 Arquitectura sistema Híbrido Eólico/Fotovoltaico

Para recolectar energía renovable en el entorno de las carreteras y suministrar energía a las instalaciones eléctricas, se propone un recolector de energía complementario fotovoltaico-eólico. La arquitectura general del sistema híbrido estudiado se basa en un mecanismo de paraguas plegable, como se muestra en la Figura 3. El sistema general contiene tres submódulos principales: (1) módulo de recolección de energía solar, (2) módulo de recolección de energía eólica y (3) módulo de almacenamiento de energía. El sistema propuesto se instala en el parter de la carretera para evitar ocupar terreno adicional. La estructura del sistema híbrido es un paraguas que se puede plegar y desplegar. La parte superior del sistema es un recolector de energía solar plegable, que puede desplegarse al sol para capturar energía solar. Por la noche y en días lluviosos, el módulo de captación solar se puede plegar para proteger el panel solar contra daños.

La parte inferior del sistema híbrido es un recolector de energía eólica extensible, que puede recolectar la energía eólica producida por vehículos en movimiento. Por lo tanto, es muy portátil y fácil de implementar, logrando además la autoprotección. La electricidad generada por los recolectores de energía eólica y solar se almacena en el módulo de almacenamiento de energía, que puede suministrar energía a las instalaciones eléctricas de las carreteras.

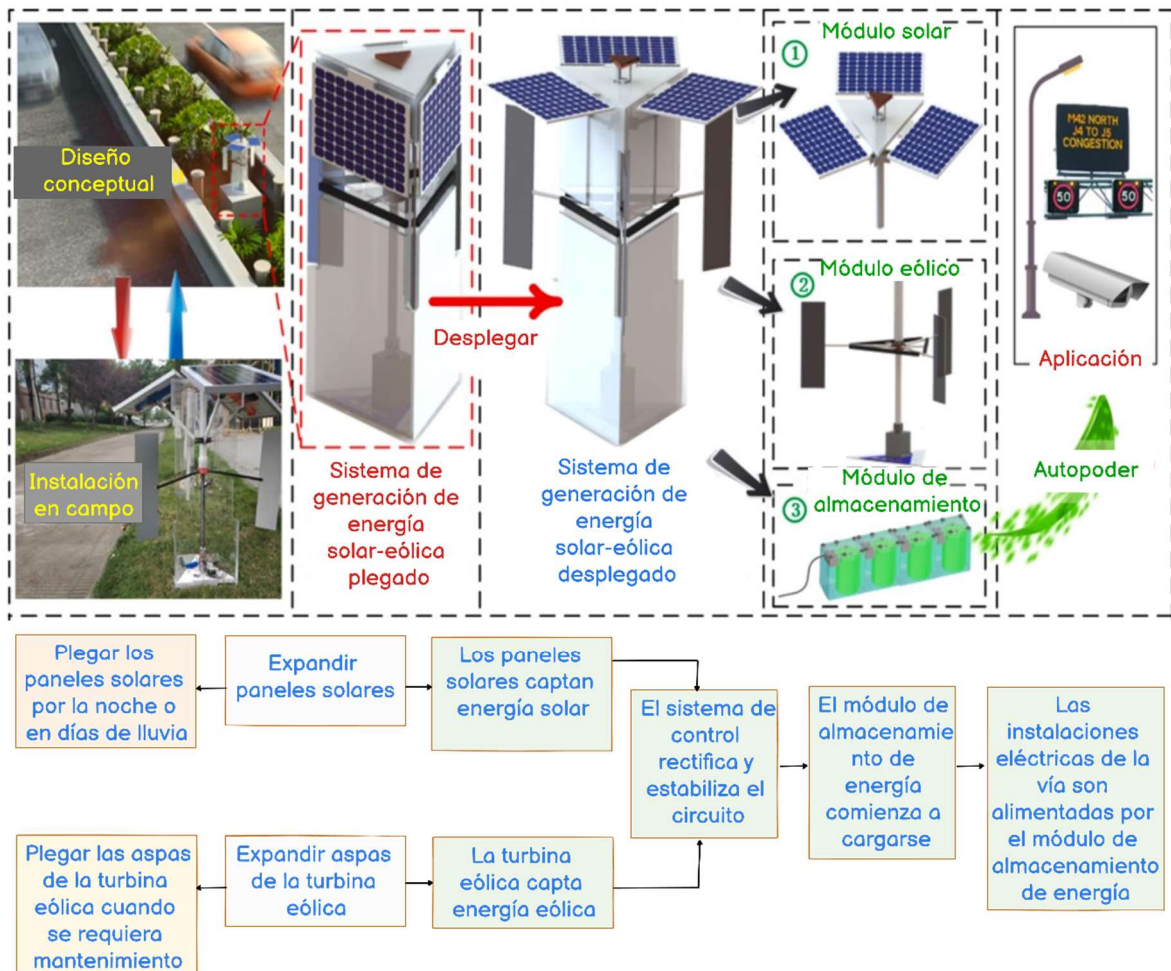


Figura 3. Arquitectura del sistema híbrido

Fuente: Autor

2.2 Fundamentación Teórica

En este capítulo, se profundiza en los fundamentos teóricos que sustentan el diseño del sistema híbrido eólico/fotovoltaico para el alumbrado público en la vía Cuenca-Azogues. En primer lugar, se revisa el concepto de alumbrado público y su importancia en el contexto de la infraestructura vial. Posteriormente, se analizan en detalle los sistemas de generación fotovoltaica, explorando los principios de la radiación solar, los diferentes tipos de sistemas y sus componentes clave.

Asimismo, se examina la tecnología de generación eólica, abordando la naturaleza del viento, las diversas tipologías de sistemas eólicos y sus elementos constitutivos. Esta amplia cobertura de los sistemas fotovoltaicos y eólicos sienta las bases para comprender la integración de ambas tecnologías en un diseño híbrido, maximizando así la eficiencia y la

confiabilidad del sistema de alumbrado público. Al final de este capítulo, el lector habrá adquirido una sólida comprensión de los fundamentos teóricos que respaldan el desarrollo del proyecto.

2.3 Estado del arte

En el contexto actual, las energías renovables han cobrado una relevancia sin precedentes debido a la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La energía solar y eólica, en particular, han demostrado ser fuentes viables y sostenibles que contribuyen significativamente a la diversificación de la matriz energética global (Brito & Icaza, 2017). Sin embargo, su implementación en sistemas de infraestructura crítica, como el alumbrado público, enfrenta desafíos técnicos y económicos que deben ser abordados. Además, las políticas gubernamentales y los avances tecnológicos han impulsado la investigación y el desarrollo de soluciones innovadoras que integren estas fuentes de energía en sistemas híbridos, maximizando así su eficiencia y viabilidad (Pulla Galindo et al., 2021).

La adopción de tecnologías híbridas, que combinan energía eólica y fotovoltaica, se presenta como una solución prometedora para mejorar la sostenibilidad y eficiencia del alumbrado público en vías rápidas (Morocho et al., 2021). Este enfoque no solo aprovecha las ventajas complementarias de ambas fuentes de energía, sino que también proporciona una mayor estabilidad y fiabilidad en la generación de energía (Macas et al., 2022). En este marco, es fundamental realizar una revisión exhaustiva de la literatura científica existente para identificar y evaluar las soluciones propuestas para el problema del alumbrado público sostenible. Esta revisión permitirá sentar las bases teóricas y prácticas necesarias para el diseño y simulación de un sistema híbrido eólico/fotovoltaico específico para la vía Cuenca – Azogues, proporcionando así un modelo replicable en otras regiones de Ecuador.

El estudio realizado por Brito & Icaza (2017), aborda la factibilidad de implementar sistemas híbridos de generación de energía eólica y fotovoltaica en Quingeo, Ecuador. Fundamentado en la teoría de energías renovables, el estudio se sustenta en el análisis de recursos naturales como el viento y la irradiación solar. En cuanto a lo que a la metodología se refiere, se instaló una estación meteorológica para recopilar datos durante tres meses, evaluando velocidad y dirección del viento; radiación solar y temperatura. Los resultados obtenidos a partir de modelos matemáticos y simulaciones indican que las condiciones en Quingeo son favorables para la generación de energía híbrida. Por lo que, el estudio concluye que la implementación de estos sistemas es viable, recomendando su aplicación para cubrir la demanda energética local y fomentar el turismo sostenible mediante el uso de recursos naturales disponibles.

El trabajo llevado a cabo por Samaniego & Icaza (2017), analiza la viabilidad de un sistema híbrido que combina energía eólica y fotovoltaica para cubrir las necesidades energéticas de un centro turístico. El estudio se fundamenta en la recopilación de datos meteorológicos, incluyendo irradiación solar y velocidad del viento, utilizando una estación meteorológica profesional. La metodología incluye el dimensionamiento de los equipos del sistema en función de la demanda eléctrica y las condiciones de las fuentes renovables. Los resultados indican que el sistema fotovoltaico cubre el 81.29% de la energía requerida, mientras que el sistema eólico cubre el 18.73%. Se concluye que, aunque el sistema híbrido es beneficioso para el ámbito turístico y la conservación del medio ambiente, no es económicamente viable para la demanda eléctrica del centro turístico debido a los altos costos de inversión.

Por su parte, la investigación expuesta por Macas et al. (2022) se centra en el diseño e implementación de un sistema fotovoltaico para un centro médico en una comunidad rural de Ecuador. En primer lugar, el artículo contextualiza la necesidad de energía renovable en áreas rurales debido a la falta de acceso fiable a la red eléctrica convencional. En la metodología, se utilizó un enfoque descriptivo y experimental, incluyendo la recolección de datos de radiación solar y la modelación del sistema con herramientas como Simulink-Matlab, AutoCAD y Dialux. Los resultados indicaron que la instalación del sistema fotovoltaico puede satisfacer completamente la demanda eléctrica del centro médico, además de ser económicamente viable a largo plazo, recuperando la inversión inicial en aproximadamente cuatro años y medio.

Desde otra perspectiva, Bernal & Icaza (2021) estudia la implementación de un sistema fotovoltaico para la iluminación ornamental de la iglesia de Turi en Cuenca. Basado en principios de eficiencia energética y el efecto fotoeléctrico, el estudio recopila datos de irradiación solar del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) y utiliza simulaciones en Dialux para diseñar el sistema lumínico. Los resultados indican que el sistema es viable y mejora la autonomía energética, reduciendo el consumo de la red pública. Es así como, el estudio concluye que modernizar la iluminación con LEDs y energías renovables es crucial para la sostenibilidad y eficiencia energética del proyecto.

La investigación descrita por Morocho et al. (2021), analiza la aplicación de sistemas fotovoltaicos para la iluminación de monumentos turísticos en áreas rurales, destacando los beneficios ambientales y socioeconómicos. Mediante el uso de aplicaciones especializadas para analizar la radiación solar y la temperatura, como el software Dialux, se demuestra que los sistemas fotovoltaicos pueden alcanzar niveles de iluminación comparables a los sistemas convencionales. Es así como, los resultados confirman la viabilidad del diseño y sugieren que la implementación de estos sistemas no solo mejora la calidad de vida y promueve el turismo,

sino que también reduce el impacto ambiental, convirtiendo esta tecnología en una opción viable y sostenible.

El artículo, propuesto por Córdova-González et al. (2024), examina la viabilidad de un sistema híbrido de energía renovable en Marianza-Cuenca, una zona vulnerable a deslizamientos de tierra. Para lo cual, basado en principios de energía sostenible y resiliencia, el estudio utiliza datos de viento, radiación solar y energía hidro cinética, empleando la herramienta Homer Pro para modelar el sistema. Los resultados muestran que, el sistema híbrido es económicamente viable con un costo de 0.89 USD/kWh, además, este puede operar de manera autónoma en emergencias, garantizando un suministro eléctrico confiable. Asimismo, el estudio concluye que, estos sistemas son cruciales para mejorar la seguridad y la calidad de vida en áreas vulnerables.

En la investigación realizada por Pulla Galindo et al. (2021), presentan una metodología para estimar la reducción de emisiones de CO₂ y el ahorro energético mediante luminarias de potencia conmutable. De manera que, basado en principios de eficiencia energética, el estudio recoge datos de luminarias instaladas en Cuenca en 2019, midiendo el consumo energético y la reducción de emisiones. En este contexto, los resultados muestran un ahorro significativo de energía y una notable disminución de CO₂ y contaminación lumínica. Por lo que, los autores mencionan que las luminarias de doble nivel de potencia son efectivas para ahorrar energía y reducir emisiones sin afectar el rendimiento del alumbrado público.

Por su parte, Icaza-Alvarez et al. (2023), en su investigación, analiza el mercado eléctrico de Ecuador, destacando el potencial y las proyecciones de las fuentes de energía renovable. En este sentido, utilizando el software EnergyPLAN, los autores proyectan que Ecuador podría lograr una matriz energética 100% renovable para 2050. Asimismo, se enfatiza el impacto positivo de las políticas estatales y la reforma de la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica en la expansión de las energías renovables. Esto lleva a la conclusión que, aunque el marco legal ha mejorado, se requieren ajustes económicos y de políticas específicas para maximizar el potencial de las energías renovables y asegurar un futuro energético sostenible para Ecuador.

Desde otra perspectiva, los autores Pulla Galindo et al. (2021) presentan una metodología para estimar la reducción de emisiones de CO₂ y el ahorro energético mediante luminarias de potencia conmutable instaladas en 2019 en Cuenca. Basado en principios de eficiencia energética, el estudio midió el consumo energético y la reducción de emisiones de estas luminarias. Los resultados mostraron un ahorro significativo de energía y una disminución notable de CO₂ y contaminación lumínica. Lo que lleva a la conclusión de que,

las luminarias de doble nivel de potencia son efectivas para ahorrar energía y reducir emisiones sin afectar el rendimiento del alumbrado público.

La investigación de Galindo et al. (2022) examina el sistema de alumbrado público en Ecuador y su marco legal. Es así como, basado en datos del ARCONEL y fuentes oficiales, el estudio revela que, en 2019, el 5.56% de la energía generada (1382.14 GWh) se destinó al alumbrado público. Por lo que, aunque se han mejorado las infraestructuras, la falta de un plan claro para reemplazar las luces de sodio por tecnología LED limita la eficiencia energética y la modernización del sistema. Esto lleva a la conclusión de que, es crucial definir estrategias para implementar tecnología LED y mejorar la sostenibilidad del alumbrado público.

El artículo expuesto por Bangura et al. (2023), propone un sistema híbrido solar-eólico usando MATLAB/Simulink. El sistema, compuesto por celdas fotovoltaicas y una turbina eólica con generador síncrono de imanes permanentes (PMSG), emplea controladores MPPT para maximizar la extracción de energía bajo diversas condiciones climáticas. En este sentido, los resultados demuestran que el sistema híbrido proporciona una fuente de energía estable y eficiente, adaptándose a variaciones meteorológicas impredecibles. Asimismo, los autores concluyen que la combinación de energía solar y eólica es efectiva para asegurar un suministro energético fiable y sostenible en áreas con variabilidad climática.

Por su parte, Stoev & Matanov (2022) presentan un modelo de simulación para un sistema de alumbrado público con luminarias LEDs. En este sentido, la investigación se centra en la emulación del funcionamiento de la instalación tanto en modo normal como en condiciones de atenuación del flujo luminoso. El modelo tiene aplicaciones amplias, como el estudio de la eficiencia energética bajo diferentes opciones de control y la evaluación de la distribución de armónicos de corriente generados por la instalación de iluminación. De manera que, el trabajo ofrece una plataforma para explorar diversas estrategias de ahorro de energía y mejorar el rendimiento de los sistemas de alumbrado público basados en tecnología LED.

Por otro lado, Hossain et al. (2022) aborda el desarrollo de un sistema híbrido solar-eólico para alumbrado público, utilizando la tecnología IoT para optimizar la vida útil de las baterías y reducir los costos. En este contexto, el sistema genera 12V DC sin necesidad de convertidores AC, lo que disminuye los costos del sistema. Asimismo, el prototipo construido y simulado en EasyEDA muestra estabilidad de respaldo de 10 horas diarias y valida la eficacia del sistema teórico. De manera que, los resultados sugieren una contribución significativa a la reducción de emisiones de CO₂ y a la disminución de los subsidios gubernamentales destinados al alumbrado público, demostrando la viabilidad de lograr un alumbrado público de energía neta cero.

Desde otra perspectiva, Srivastava (2022) explora un diseño innovador de un sistema híbrido que combina turbinas eólicas y paneles fotovoltaicos. El estudio destaca el creciente interés en las energías renovables debido a sus beneficios ambientales y su capacidad de ser reutilizadas sin causar daño al medio ambiente. La investigación incluye simulaciones realizadas en MATLAB/SIMULINK, analizando diferentes condiciones de salida para mejorar la eficiencia de los sistemas híbridos. Por último, los resultados demuestran que la integración de estos sistemas puede aumentar la eficiencia y la sostenibilidad energética, ofreciendo una solución prometedora para el suministro de electricidad.

Asimismo, Tamoor et al. (2022) se enfoca en el dimensionamiento óptimo de un sistema fotovoltaico híbrido centralizado, para el alumbrado eficiente de calles en una institución educativa. Utilizando el software PVsyst, los investigadores analizaron datos de irradiación, temperaturas y horas de luz solar para diseñar un sistema que incluye módulos bifaciales de alta eficiencia, inversores híbridos y un sistema de almacenamiento de energía. El análisis muestra una producción anual significativa de energía, una alta relación de rendimiento y una reducción notable de emisiones de CO₂. Por último, el estudio concluye que el sistema propuesto es una solución viable y eficiente para el alumbrado público, con beneficios ambientales y económicos importantes.

De la misma forma, Bai et al. (2023) propone una lámpara inteligente, misma que combina energía eólica, así como, energía solar para iluminación vial y carga de vehículos. Este dispositivo se aplica específicamente en una región rural de China. De manera que, el diseño multifuncional incluye características de ahorro de energía, así como, de monitoreo, y se estima un ahorro de aproximadamente 4.1 millones de kWh de electricidad al año. Además, el análisis de costos y beneficios indica que esta tecnología puede promover el desarrollo económico y turístico local, ofreciendo beneficios económicos directos. Este enfoque destaca la viabilidad de soluciones híbridas para mejorar la infraestructura de alumbrado público en áreas rurales.

Por otro lado, Ali & Ammari (2022) presenta un estudio experimental, donde se investiga el rendimiento y el costo de un sistema de alumbrado híbrido eólico-solar para postes de iluminación en autopistas. Para lo cual, utilizando condiciones locales de diseño y el software HOMER, se evaluaron los índices de rendimiento económico y energético del sistema. Los resultados muestran que el sistema híbrido, compuesto por módulos fotovoltaicos y turbinas eólicas Banki-Darrieus, es eficaz para proporcionar energía a las luminarias LED de las calles. Asimismo, el análisis de HOMER indica que la opción híbrida es la más viable económicamente, destacando su potencial para aplicaciones en alumbrado público sostenible.

En el estudio propuesto por Bhuyarkar et al. (2023) presenta un sistema híbrido de alumbrado público basado en IoT, utilizando energía solar y eólica. El sistema incluye componentes como paneles solares, modelos helicoidales, baterías, y reguladores, controlados mediante Arduino IDE. Durante el día, la energía almacenada en las baterías, por los paneles solares, se utiliza para alimentar las luces LED durante la noche, con la ayuda adicional de la energía eólica. El sistema IoT permite el control y monitoreo eficiente, facilitando la detección de fallas y mejorando la eficiencia energética. Por último, los autores concluyen que este enfoque es clave para las infraestructuras de ciudades inteligentes, puesto que, ofrecen una solución energética autosuficiente y sostenible.

Por otro lado, Alkalbani & Gani (2022) propone un estudio de viabilidad técnica y económica de un modelo híbrido solar-eólico para el alumbrado de autopistas en Omán. Para lo cual, se evalúa parámetros de producción de energía, costos de capital y retorno de inversión. El modelo propuesto tiene como objetivo aprovechar la energía generada por el movimiento de vehículos en la carretera para convertirla en electricidad, complementada con energía solar. Asimismo, el análisis muestra un período de amortización de aproximadamente 3.2 años y un retorno de inversión del 221% en 10 años. Por último, los resultados sugieren que el modelo híbrido puede proporcionar una solución sostenible y económicamente viable para el alumbrado de autopistas.

Otro estudio, propuesto por Stoev & Matanov (2022) desarrolla un modelo de simulación para un sistema de alumbrado público con LEDs, similar a la investigación previa de Stoev y Matanov. El enfoque se centra en la eficiencia energética y la distribución de armónicos de corriente, evaluando diferentes opciones de control para optimizar el rendimiento del sistema de iluminación. La simulación ofrece una herramienta valiosa para estudiar estrategias de ahorro de energía y mejorar la gestión de sistemas de alumbrado público. De manera que, el trabajo reafirma la importancia de los modelos de simulación para el desarrollo y la implementación de tecnologías de iluminación más eficientes y sostenibles.

El análisis detallado de la literatura sobre la implementación de sistemas de energía renovable en Ecuador revela varios elementos comunes, además, se identifican carencias en los proyectos y tecnologías relacionados (ver Tabla 1). Los estudios revisados destacan la viabilidad técnica y los beneficios de los sistemas híbridos eólicos-fotovoltaicos y fotovoltaicos para diversas aplicaciones, incluyendo el alumbrado público, el turismo y los centros médicos. Sin embargo, varios aspectos aún necesitan ser mejorados para optimizar su implementación y eficiencia.

En primer lugar, la mayoría de los proyectos analizados demuestran la efectividad de las tecnologías renovables para reducir el consumo energético y las emisiones de CO₂. No

obstante, se observa una carencia de planes claros para la modernización de infraestructuras existentes, especialmente en lo que respecta a la sustitución de luminarias tradicionales por tecnologías LED, las cuales son más eficientes. Además, muchos estudios destacan la viabilidad económica a largo plazo de estos sistemas, pero señalan los altos costos iniciales de inversión como una barrera significativa, particularmente en aplicaciones turísticas y comunitarias.

Otro aspecto crítico identificado es la falta de políticas integrales y coordinación entre sectores para facilitar la transición energética. Aunque las reformas legales han mejorado el marco regulatorio, se requieren ajustes económicos y de políticas específicas para maximizar el potencial de las energías renovables. También se ha identificado la necesidad de estrategias de educación y concienciación pública para apoyar la adopción de estas tecnologías.

Es así como, el presente estudio propone el diseño y simulación de un sistema híbrido eólico/fotovoltaico para el alumbrado público en la vía Cuenca – Azogues, el cual, pretende abordar la evaluación de la carga energética y las condiciones climáticas específicas de la zona. Asimismo, se busca determinar los requerimientos energéticos de las luminarias y realizar un análisis detallado de la irradiancia solar y velocidad del viento, datos esenciales para el diseño eficiente del sistema híbrido.

Tabla 1. Caracterización de elementos relevantes de estado del arte.

Referencia	Aspecto relevante	Beneficio identificado	Aspecto por Mejorar
(Brito & Icaza, 2017)	Implementación de sistemas híbridos eólicos-fotovoltaicos en Quingeo	Generación de energía sostenible y promoción del turismo	Optimización de la integración de recursos naturales
(Samaniego & Icaza, 2017)	Sistemas híbridos para centros turísticos	Beneficios turísticos y ambientales	Viabilidad económica y reducción de costos de inversión
(Macas et al., 2022)	Sistemas fotovoltaicos para centros médicos rurales	Satisfacción completa de la demanda eléctrica y viabilidad	Reducción del tiempo de recuperación de la inversión inicial

		económica a largo plazo	
(Bernal & Icaza, 2021)	Iluminación ornamental con sistemas fotovoltaicos	Mejora de la autonomía energética y reducción del consumo de la red pública	Ampliación del uso de LEDs y tecnologías eficientes
(Morocho et al., 2021)	Iluminación de monumentos turísticos con energía fotovoltaica	Mejora de la calidad de vida, promoción del turismo y reducción del impacto ambiental	Optimización del diseño para maximizar eficiencia energética
(Córdova-González et al., 2024)	Sistemas híbridos en zonas vulnerables a deslizamientos de tierra	Suministro eléctrico confiable en emergencias y mejora de la seguridad	Reducción de costos y mejora de la resiliencia del sistema
(Pulla Galindo et al., 2021)	Luminarias de potencia conmutable para alumbrado público	Ahorro energético y reducción de emisiones de CO2	Optimización del rendimiento y ampliación de su implementación
(Icaza-Alvarez et al., 2023)	Proyecciones de energías renovables en Ecuador para 2050	Potencial de lograr una matriz energética 100% renovable	Ajustes económicos y políticas específicas para maximizar el potencial
(Galindo et al., 2022)	Alumbrado público en Ecuador y marco legal	Mejora de infraestructuras y eficiencia energética	Definición de un plan claro para la implementación de tecnología LED

(Bangura et al., 2023)	Sistema híbrido solar-eólico usando MATLAB/Simulink	Suministro energético fiable y sostenible en áreas con variabilidad climática	Optimización de la integración de sistemas de control MPPT
(Stoev & Matanov, 2022)	Simulación de un sistema de alumbrado público con luminarias LEDs	Mejora de la eficiencia energética y evaluación de armónicos de corriente	Desarrollo de estrategias de control más eficientes
(Hossain et al., 2022)	Sistema híbrido solar-eólico para alumbrado público con tecnología IoT	Optimización de la vida útil de baterías y reducción de costos	Implementación de sistemas IoT en mayor escala
(Srivastava, 2022)	Diseño innovador de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico	Aumento de la eficiencia y sostenibilidad energética	Integración de sistemas híbridos en áreas urbanas
(Tamoor et al., 2022)	Dimensionamiento óptimo de un sistema fotovoltaico híbrido centralizado	Alta producción de energía y reducción de emisiones de CO2	Evaluación económica y mejora del diseño del sistema
(Bai et al., 2023)	Lámpara inteligente para iluminación vial y carga de vehículos	Ahorro significativo de energía y promoción del desarrollo económico local	Optimización del diseño multifuncional para otras regiones

(Ali & Ammari, 2022)	Sistema de alumbrado híbrido eólico-solar para autopistas	Provisión eficiente de energía y reducción de costos	Evaluación de costos y mejora del rendimiento del sistema
(Bhuyarkar et al., 2023)	Sistema híbrido de alumbrado público basado en IoT	Control y monitoreo eficiente, mejora de la eficiencia energética	Ampliación de la implementación de sistemas IoT en infraestructuras urbanas
(Alkalbani & Gani, 2022)	Modelo híbrido solar-eólico para el alumbrado de autopistas en Omán	Solución sostenible y económicamente viable	Optimización de costos y mejora del retorno de inversión

Fuente: Autor

Complementando, lo antes dicho, se plantea la integración de tecnologías avanzadas de alumbrado público, incluyendo luminarias LED, con el fin de maximizar la eficiencia y reducir el consumo energético. Por último, el estudio contempla la realización de simulaciones para evaluar el rendimiento y la viabilidad económica del sistema propuesto, validando su potencial para mejorar la sostenibilidad y promover la adopción de energías renovables en otras regiones de Ecuador.

2.4 Alumbrado público en carreteras

La iluminación en carreteras de alta velocidad juega un papel crucial en la seguridad vial y la fluidez del tráfico. Durante la noche, una adecuada iluminación nocturna permite una mejor visibilidad, reduce accidentes y aumenta la percepción de seguridad, así como, el confort para los conductores. Una iluminación adecuada proporciona varios aspectos esenciales (Ghosh & Banerjee, 2022).

- **Mejora la visibilidad:** Permite a los conductores identificar con mayor claridad obstáculos, señales de tráfico y otros vehículos en la carretera.
- **Reduce la fatiga visual:** Disminuye la tensión ocular y el cansancio al conducir, mejorando la capacidad de reacción ante situaciones inesperadas.
- **Disminuye los accidentes:** La mejor visibilidad y la reducción de la fatiga visual se traducen en una menor cantidad de accidentes de tránsito.

- **Aumenta la fluidez del tráfico:** Una mejor visibilidad facilita la conducción y reduce la congestión vehicular.

Por otro lado, existen varios factores que se deben considerar para lograr una iluminación óptima en carreteras de alta velocidad (Y. Zhang, 2022), estos son:

- **Normativas y Regulaciones:** Es fundamental cumplir con las normas específicas que regulan la iluminación en estas vías. Estas normas establecen parámetros como la intensidad lumínica, la uniformidad y la distribución de la luz.
- **Tecnología y Eficiencia Energética:** La elección de tecnologías eficientes, como la iluminación LED, ofrece importantes beneficios. Esta tecnología reduce el consumo energético, mejora la calidad lumínica y aumenta la durabilidad del sistema.
- **Diseño Lumínico:** La planificación del diseño lumínico es crucial para obtener una iluminación óptima. Se deben considerar aspectos como la altura de las luminarias, el ángulo de inclinación, la separación entre postes y la temperatura de color.

Estas consideraciones traen consigo beneficios derivados de una iluminación eficiente, entre los que se encuentran (Jiang et al., 2021):

- **Mayor seguridad vial:** Se reduce la cantidad de accidentes de tránsito, lo que se traduce en una mayor seguridad para los conductores y pasajeros.
- **Eficiencia energética:** Se reduce el consumo de energía y las emisiones de carbono, contribuyendo a la protección del medio ambiente.
- **Menores costos operativos:** La eficiencia energética y la mayor durabilidad de las luminarias LED se traducen en una reducción de los costos operativos a largo plazo.
- **Mejora en la experiencia del usuario:** La conducción nocturna se vuelve más segura, cómoda y placentera para los usuarios.

En contraste, se puede afirmar que la iluminación en carreteras de alta velocidad es un factor fundamental para la seguridad vial, la eficiencia energética y la mejora en la experiencia del usuario. En este sentido, es importante considerar los diversos factores que influyen en el diseño del alumbrado para lograr una iluminación óptima que maximice sus beneficios (Estaji & Sauter, 2022).

2.5 Sistema de generación fotovoltaico

El Sol, como fuente primaria de energía en la Tierra, funge como base para las tecnologías de energía solar que permiten generar energía limpia. Para comprender a cabalidad la tecnología solar fotovoltaica, se hace indispensable que se obtenga una base

sólida de conocimiento sobre el Sol, la relación que este tiene con la Tierra y los recursos solares que se pueden aprovechar (W. Liu, 2023).

2.5.1 Espectro de radiación

La radiación solar es una fuente vital de energía para la vida en la tierra. Se compone de tres tipos principales: ultravioleta (UV), luz visible e infrarroja (IR). El espectro solar, que se muestra en la Figura 4, indica la distribución de la energía radiante en función de la longitud de onda (Wu et al., 2023).

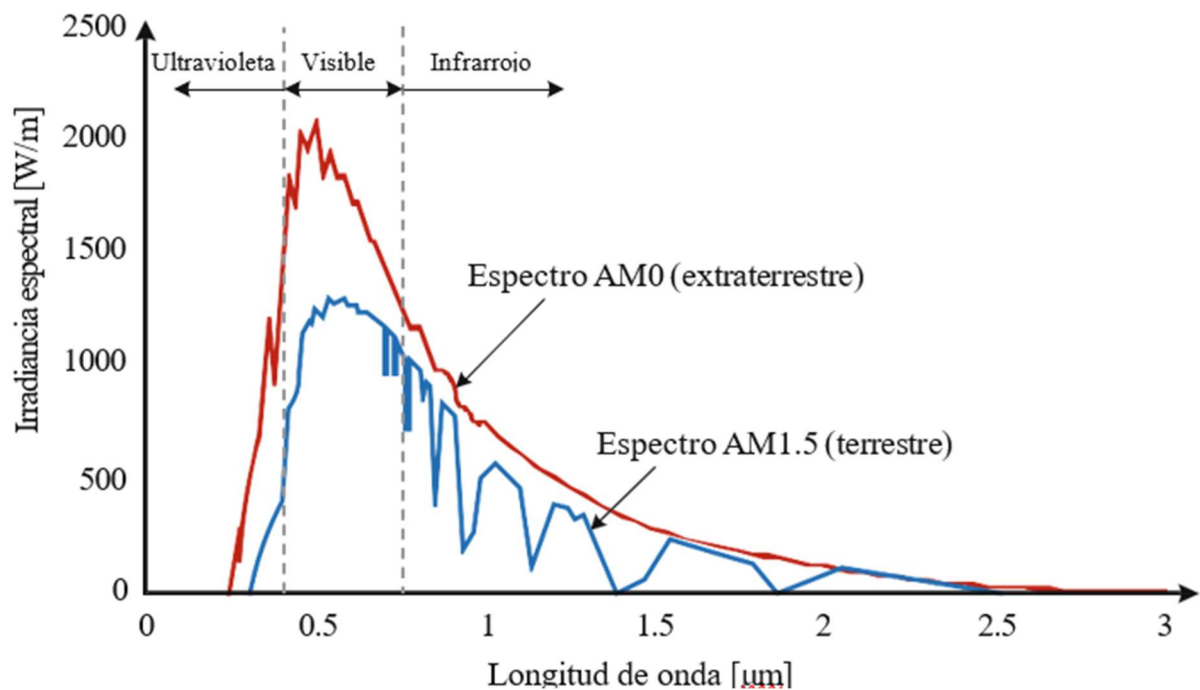


Figura 4. Espectro solar de radiación

Fuente: (Wu et al., 2023)

La Radiación Ultravioleta (UV) ocupa un 6,6% del espectro solar y se divide en tres bandas: UV-A, UV-B y UV-C. La mayor parte de la radiación UV-C es absorbida por la atmósfera, mientras que la UV-A y la UV-B llegan a la superficie terrestre. La exposición excesiva a la radiación UV puede ser perjudicial para la salud, pero también es necesaria para la síntesis de vitamina D (Elsarrag et al., 2019).

La luz visible representa el 44,7% del espectro solar y es la que permite la visión humana. Se compone de diferentes colores, cada uno con una longitud de onda específica.

La radiación Infrarroja (IR) constituye el 48,7% del espectro solar y se divide en tres bandas: IR-A, IR-B e IR-C. La radiación IR se siente como calor y es utilizada por diversos organismos para regular su temperatura corporal (X. Zhang et al., 2023).

El índice de masa de aire (AM) es un factor que determina la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre. El espectro AM0 representa la radiación extraterrestre antes de que interactúe con la atmósfera, mientras que el espectro AM1.5 es la radiación que llega al suelo después de atravesarla. La diferencia entre ambos espectros se debe a la absorción y dispersión de la radiación solar por los gases y partículas atmosféricas (X. Zhang et al., 2023).

2.5.2 Recurso solar

La irradiancia horizontal global (GHI), que representa la cantidad total de radiación solar que incide sobre una superficie horizontal terrestre, se compone de tres elementos: la irradiancia normal directa (DNI), la irradiancia horizontal difusa (DHI) y la radiación reflejada por el suelo (Xiao et al., 2023).

Debido a que la mayoría de los módulos solares se instalan con un ángulo de inclinación, la GHI se utiliza como base para calcular la irradiancia solar en una superficie inclinada (conjunto solar). Este cálculo permite determinar el ángulo de inclinación óptimo para obtener un alto rendimiento de energía eléctrica de corriente continua (CC) (Xue et al., 2023).

Por otro lado, la DNI es un factor crucial en la tecnología solar fotovoltaica de concentración. Esta indica la cantidad de radiación solar directa que recibe una superficie por unidad de área que se orienta constantemente hacia el rayo solar. Además, la relación entre GHI, DHI y DNI se puede expresar mediante la ecuación 1, en función del ángulo cenital z (S. Hao et al., 2023).

$$GHI = DHI + DNI * \cos(z) \quad (1)$$

La radiación reflejada por el suelo es una parte importante de la energía solar total que llega a la Tierra. Esta se mide mediante el albedo, que es la proporción de la radiación solar que una superficie refleja en relación con la cantidad total que recibe. El albedo varía entre 0 y 1, siendo 0 para superficies completamente negras que absorben toda la radiación y 1 para superficies completamente blancas que la reflejan por completo. El albedo depende de la ubicación, la estación del año y la hora del día (Li et al., 2023).

La irradiancia inclinada global (GTI) es la cantidad total de radiación solar que incide sobre una superficie con una inclinación y un ángulo de acimut específicos. Se compone de la radiación directa, la radiación difusa y la radiación reflejada por el suelo. La GTI, junto con

la GHI, DNI, DHI y la radiación reflejada en el suelo, se miden en kWh/m² por período (Li et al., 2023).

La Figura 5 ilustra cómo los rayos del Sol interactúan con la tierra: algunos inciden directamente sobre los módulos solares, otros se reflejan en el suelo y otros se difunden por las nubes. Cabe destacar que una parte importante de la radiación solar es absorbida por las nubes (Tan et al., 2022).

El potencial fotovoltaico del mundo se muestra en la Figura 6, donde se observa que África posee el mayor potencial de energía solar. Las Figuras 7 y 8 ilustran la variación del DNI y GHI a nivel mundial, respectivamente. Se puede apreciar que el DNI es mayor en torno a los dos trópicos, mientras que el GHI es más alto en las zonas aledañas al cinturón ecuatorial (Gafar, 2019).

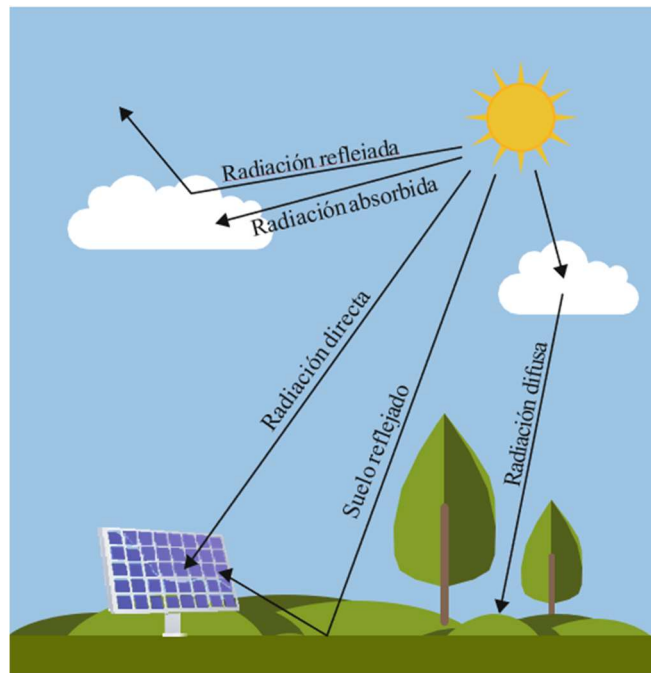


Figura 5. Interacción de la radiación

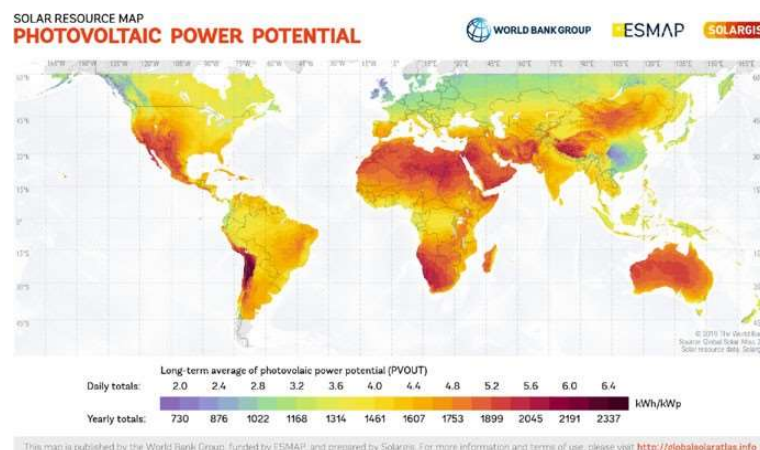


Figura 6. Potencial fotovoltaico mundial

Fuente: (Gafar, 2019)

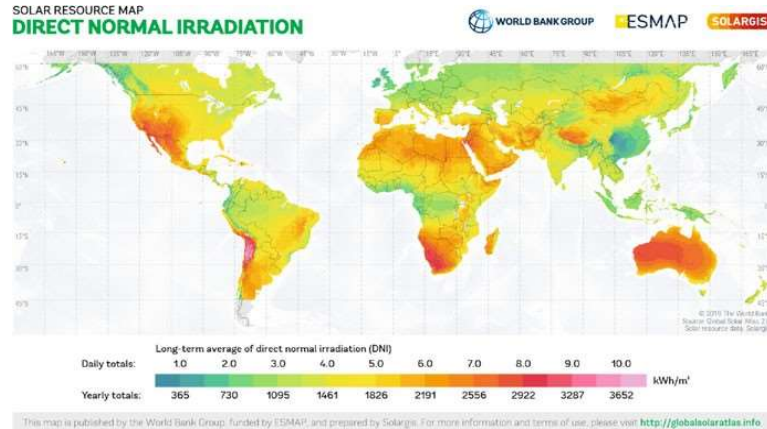


Figura 7. Irradiación normal directa global

Fuente: (Gafar, 2019)

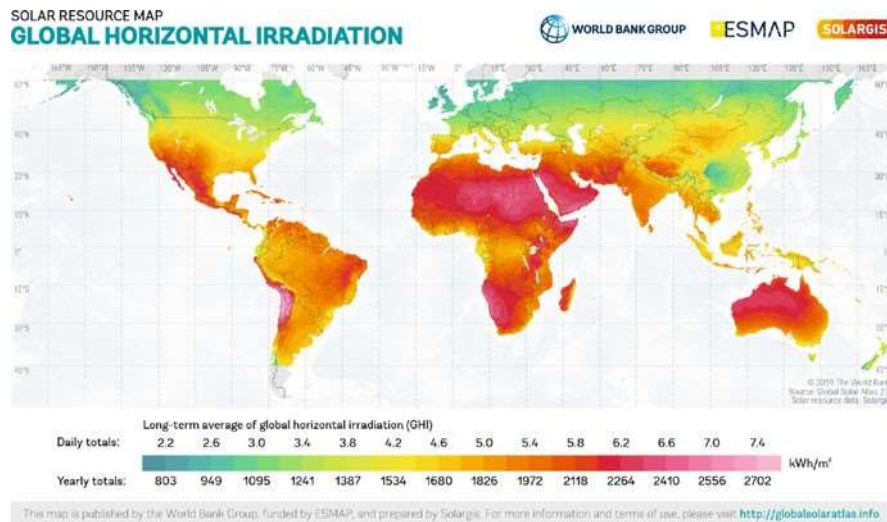


Figura 8. Irradiación horizontal global

Fuente: (Gafar, 2019)

2.5.3 Hora pico solar

Las horas pico de sol (PSH) se definen como el período de tiempo en un día en el que la irradiancia horizontal global (GHI) promedio es de 1000 W/m^2 . La cantidad de irradiancia solar es máxima al mediodía, con valores que pueden superar los 1000 W/m^2 . En otras horas del día, este valor puede ser mayor o menor a 1000 W/m^2 , siendo menos probable que supere este umbral (Afonaa et al., 2019).

La Figura 9 ilustra el concepto de PSH para una ubicación específica, mostrando la curva de irradiancia solar durante un día cualquiera. En este ejemplo, el valor de PSH es de 6 kWh/m² por día, lo que significa que durante 6 horas (entre las 09:30 y las 15:30) la irradiancia solar promedio fue de 1 kW/m² o 1000 W/m² (Sward et al., 2019).

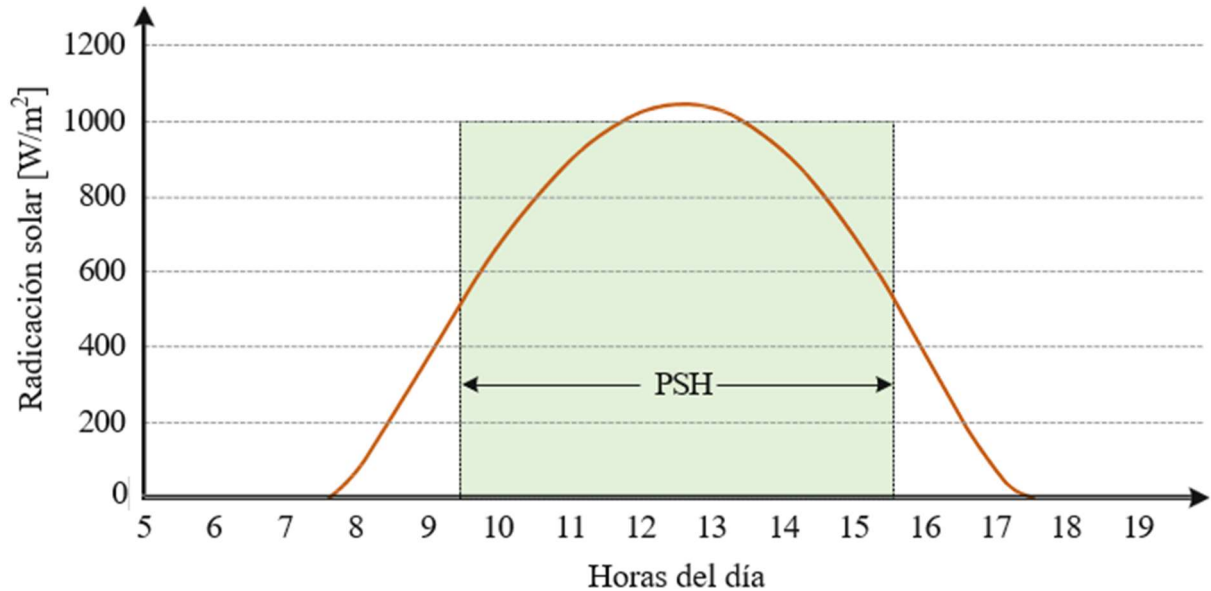


Figura 9. Variación de la irradiancia solar a lo largo del día

Fuente: (Sward et al., 2019)

Cabe destacar que el PSH varía de un lugar a otro y, en un mismo lugar, cambia diariamente. Para obtener una idea del PSH promedio de una ubicación, se suele calcular el promedio mensual, como se muestra en la ecuación 2. La unidad de PSH es kWh/m² por día (Megantoro et al., 2022).

$$PSH = \frac{\text{promedio de GHI de un mes}}{\text{número de días en el mes}} \quad (2)$$

2.6 Tipos de sistema de generación fotovoltaica

Los sistemas solares fotovoltaicos se clasifican en tres tipos principales según su conectividad a la red eléctrica, sistemas conectados a la red, sistemas autónomos o fuera de la red y sistemas híbridos, los cuales se describen a continuación (Rathore et al., 2021).

1. **Sistemas conectados a la red:** Estos sistemas inyectan la energía eléctrica generada a la red eléctrica pública.
2. **Sistemas autónomos o fuera de la red:** Estos sistemas operan de forma independiente, sin conexión a la red eléctrica. Son ideales para zonas rurales o lugares sin acceso a la red.

3. **Sistemas híbridos:** Combinan las ventajas de los dos tipos anteriores, permitiendo el autoconsumo de energía y la conexión a la red cuando sea necesario.

A escala de aplicación, los sistemas fotovoltaicos se dividen en dos tipos, sistemas a escala de servicios públicos y sistemas distribuidos (Thar et al., 2020).

1. **Sistemas a escala de servicios públicos:** Son proyectos de gran envergadura que generan energía para ser distribuida a través de la red eléctrica.
2. **Sistemas distribuidos:** Son instalaciones de menor tamaño que se instalan en hogares, empresas o edificios para su propio consumo energético. Este capítulo también profundiza en el diseño de dos sistemas solares fotovoltaicos distribuidos:
 - Sistemas solares de bombeo de agua: Utilizan la energía solar para alimentar bombas de agua, lo que permite el riego de cultivos y el acceso a agua potable en zonas sin acceso a la red eléctrica.
 - Sistemas de alumbrado público: Sustituyen las luminarias tradicionales por farolas solares, proporcionando iluminación pública sostenible y eficiente.

2.6.1 Sistemas fotovoltaicos fuera de la red

Los sistemas fotovoltaicos independientes, también conocidos como "fuera de la red" (ver Figura 10), son una alternativa popular en países en desarrollo con redes eléctricas poco confiables o zonas remotas sin acceso a la red. Su versatilidad los hace ideales para diversas aplicaciones, desde viviendas y servicios públicos (centros de salud, escuelas, condominios) hasta alumbrado público, estaciones de autobuses, bombeo de agua, telecomunicaciones, campos de refugiados y control de tráfico (semáforos). La tecnología solar se convierte en una solución atractiva frente a los altos costos de extender la red eléctrica tradicional, siendo más eficiente que construir nuevas subestaciones y líneas de transmisión (Brar et al., 2020).



Figura 10. Sistema fotovoltaico fuera de la red

Fuente: (Brar et al., 2020)

Ventajas:

- **Independencia energética:** No dependen de la red eléctrica, lo que significa un suministro constante incluso durante cortes de energía.
- **Eficiencia económica:** A largo plazo, son más económicos que los generadores a diésel, que son costosos y contaminantes.
- **Sostenibilidad ambiental:** Generan energía limpia y renovable, sin emisiones de carbono.

Funcionamiento:

Los sistemas fotovoltaicos fuera de la red capturan la energía del sol mediante paneles solares y la convierten en electricidad. Esta energía se puede utilizar directamente o almacenarse en baterías para su uso posterior (Naqvi et al., 2021).

Aplicaciones:

- **Sitios críticos:** Los sitios de telecomunicaciones, por ejemplo, requieren un suministro de energía constante para funcionar correctamente. En estos casos, se suele sobredimensionar el almacenamiento de energía para garantizar la confiabilidad incluso en condiciones climáticas adversas (Nithish et al., 2023).
- **Bombeo de agua:** En lugar de sobredimensionar las baterías, se puede sobredimensionar la capacidad de bombeo y almacenamiento de agua. Esto reduce las pérdidas por conversión de energía en las baterías (Nithish et al., 2023).

Capacidad de almacenamiento:

El número de días de autonomía determina cuánto tiempo puede el sistema funcionar sin energía solar. Este número varía de 0 a 15 días, dependiendo de la criticidad de la carga y del presupuesto. La demanda de carga diaria se multiplica por los días de autonomía para determinar la capacidad de batería requerida (Naqvi et al., 2021).

Los sistemas fotovoltaicos fuera de la red ofrecen una alternativa viable y sostenible para el suministro de energía en diversas áreas. Su eficiencia, confiabilidad y beneficios ambientales los convierten en una opción atractiva para un futuro energético más limpio y resiliente (Parihar et al., 2021).

2.6.2 Sistemas fotovoltaicos híbridos

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red normalmente no incluyen baterías, enviando el excedente de energía a la red pública. En cambio, un sistema híbrido combina la conexión a la red con un sistema de almacenamiento de energía en batería (BESS). Conocidos como "sistemas solares más almacenamiento", estos sistemas ofrecen tres fuentes de energía: la red pública, los paneles solares y la batería (Sutanto et al., 2023).

En un sistema híbrido, la energía solar se prioriza como fuente principal, seguida por la red pública y la batería. Cuando no hay energía solar disponible, se decide entre la red y la batería. Si la red es más barata, se consume de ella; pero si es costosa (como en horas pico), se utiliza la batería. El diagrama de bloques de un sistema solar fotovoltaico híbrido se muestra en la Figura 11 (Najafi-Shad et al., 2020).

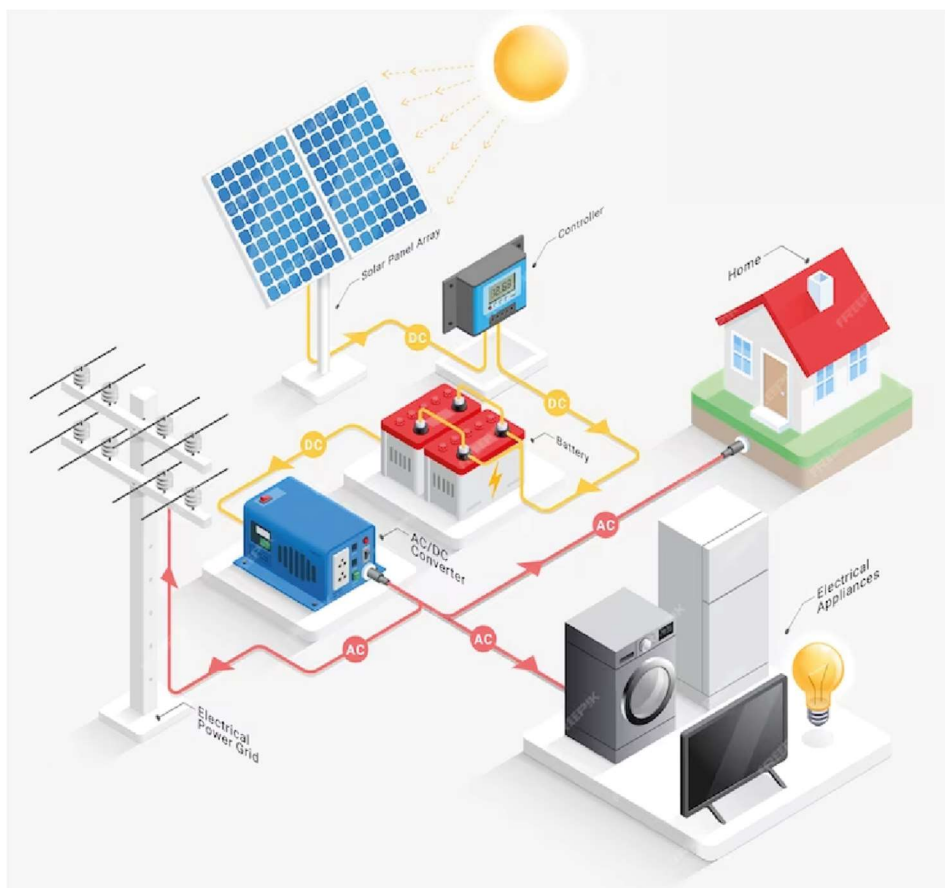


Figura 11. Sistema fotovoltaico híbrido

Fuente: (Najafi-Shad et al., 2020)

2.6.3 Sistemas solares fotovoltaicos distribuidos

Los sistemas fotovoltaicos distribuidos se caracterizan por su ubicación descentralizada y su conexión a una red eléctrica local o su funcionamiento como sistemas aislados. Estos sistemas se diseñan para cubrir necesidades específicas en diversos contextos, como el bombeo de agua, la iluminación pública, el monitoreo ambiental, la alimentación de viviendas rurales o incluso la cría de animales en acuarios al aire libre (Swiderski, 2019).

Por ejemplo, una estación meteorológica autónoma alimentada por energía solar fotovoltaica (ver Figura 12) ilustra la utilidad de estos sistemas en la medición y recolección de datos ambientales sin necesidad de conexión a la red eléctrica (Yadav et al., 2019).



Figura 12. Estación meteorológica alimentada por energía solar fotovoltaica

Fuente: (Yadav et al., 2019)

2.7 Componentes del sistema solar fotovoltaico

Si bien los módulos azul marino o negro son la parte más visible de un sistema solar fotovoltaico (PV), no son más que una pieza del rompecabezas. Estos paneles rectangulares convierten la luz solar en electricidad, pero para que sea utilizable en los hogares y dispositivos, se necesita un conjunto de componentes adicionales. En este sentido, se pueden clasificar los componentes de un sistema fotovoltaico en cinco categorías (Nicola et al., 2021):

1. **Módulo solar fotovoltaico:** Es el corazón del sistema, responsable de convertir la luz solar en energía eléctrica.
2. **Batería:** Almacena la energía producida por los módulos para su uso posterior, especialmente durante la noche o en días nublados.
3. **Controlador de carga:** Garantiza que la batería se cargue y descargue de forma segura y eficiente, evitando sobrecargas o daños.
4. **Inversor:** Transforma la energía eléctrica de corriente continua (CC) producida por los paneles en corriente alterna (CA), que es la que se utiliza en los hogares y negocios.

5. **Equilibrio del sistema:** Incluye cableado, montaje, seguimiento, refrigeración, protección y conexión a tierra, todos ellos esenciales para el correcto funcionamiento del sistema.

Por lo tanto, se puede decir que un sistema solar fotovoltaico es una compleja red de componentes que trabajan en conjunto para convertir la energía del sol en electricidad utilizable (Dutta et al., 2023).

2.7.1 Módulos solares

Los módulos fotovoltaicos son el corazón de cualquier sistema fotovoltaico, ya que son los responsables de la crucial tarea de generar energía para la carga. Estos módulos se componen de un elemento fundamental que es la célula solar. Esta célula es la que convierte la luz solar (irradiancia solar) en energía eléctrica de corriente continua (CC) mediante un proceso físico conocido como efecto fotovoltaico (Aghaei et al., 2020).

Al incidir la luz solar sobre una célula solar de silicio, se produce una diferencia de potencial entre sus dos polos de entre 0,5 y 0,68 voltios. Además, se genera una corriente que es proporcional a la cantidad de luz que incide sobre la célula, siempre que esta se encuentre en un circuito cerrado (Benda & Černá, 2020).

La Figura 13 ilustra cómo varias células solares se ensamblan en serie para crear un módulo solar. Estos módulos, a su vez, se conectan en serie para formar una cadena. Finalmente, las cadenas se conectan en paralelo para crear una matriz. Esta disposición permite satisfacer las demandas de energía a diferentes escalas, desde pequeños electrodomésticos (varios kW) hasta grandes proyectos a escala de servicio público, que se miden en megavatios (MW) e incluso gigavatios (GW) (Alaaeddin et al., 2019).

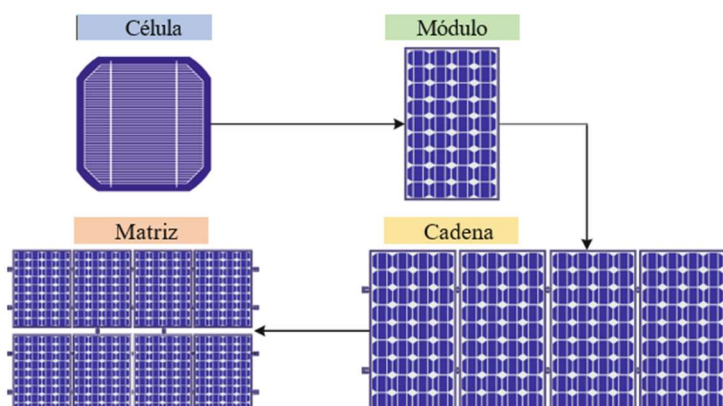


Figura 13. Diagrama esquemático de panel solar, cadena, módulo y celda.

Fuente: (Alaaeddin et al., 2019)

2.7.2 Baterías

La generación de energía en un sistema solar fotovoltaico depende de la luz solar disponible. Por lo tanto, si la energía solar es la única fuente de generación, se requiere un sistema de almacenamiento para usar la energía posteriormente o, en algunos casos, simultáneamente con la generación, dependiendo de la demanda (Brar et al., 2020).

La naturaleza intermitente de la energía solar, con un patrón de generación que no coincide con el patrón de consumo, hace necesario un sistema de almacenamiento de energía (ESS). El "almacenamiento" se refiere a sistemas que absorben electricidad, la convierten en otro tipo de energía (química, térmica o mecánica) y la liberan cuando es necesario (Weng et al., 2020).

Existen diferentes tipos de ESS disponibles, como el volante de inercia y la energía hidráulica por bombeo. Sin embargo, el almacenamiento electroquímico es el más adecuado para sistemas solares fotovoltaicos, mientras que el almacenamiento térmico (fluidos) se utiliza con Plantas de Concentración de energía Solar (CSP) (Jurasz et al., 2020).

El almacenamiento de energía resulta crucial para aprovechar al máximo la energía solar. Si bien los sistemas fotovoltaicos generan energía durante el día, no pueden hacerlo durante la noche o en días nublados. Un sistema de almacenamiento permite guardar el excedente de energía generado durante el día para utilizarlo cuando sea necesario, ya sea por la noche, en días nublados o incluso durante cortes de energía (Hasan & Serra, 2023).

Existen diferentes tipos de sistemas de almacenamiento de energía, pero el más utilizado es el almacenamiento electroquímico en forma de baterías. Estas baterías son un componente vital de cualquier sistema solar fotovoltaico y tienen un impacto considerable en su costo, confiabilidad y diseño (Yaylaci, 2021).

Los sistemas de almacenamiento de energía por batería (BESS) pueden implementarse tanto en sistemas solares conectados a la red como en sistemas independientes. En el caso de los sistemas conectados a la red, los BESS pueden almacenar el excedente de energía para inyectarlo a la red cuando la demanda es alta. En los sistemas independientes, los BESS son fundamentales para garantizar un suministro continuo de energía durante las 24 horas del día, los 7 días de la semana (Sinuraya et al., 2022).

Las baterías utilizadas en los sistemas fotovoltaicos son de tipo secundario o recargable. Esto significa que se pueden recargar y reutilizar varias veces, lo que las convierte en una solución económica y sostenible para el almacenamiento de energía solar. En definitiva, el almacenamiento de energía juega un papel fundamental en el desarrollo y la expansión de la energía solar. Permite aprovechar al máximo la energía generada por los

sistemas fotovoltaicos, aumentar la confiabilidad del suministro eléctrico y reducir la dependencia de los combustibles fósiles (Hassani et al., 2020).

2.7.3 Baterías en sistemas fotovoltaicos independientes

Los sistemas fotovoltaicos autónomos o aislados se caracterizan por no estar conectados a la red eléctrica convencional. En su lugar, estos sistemas emplean baterías para almacenar la energía generada por los paneles solares (Weng et al., 2020).

La Figura 14 ilustra una configuración típica de un sistema solar fotovoltaico aislado de la red con BESS. La naturaleza fluctuante de la energía solar exige el uso de baterías para garantizar un suministro continuo (Anitha et al., 2023).

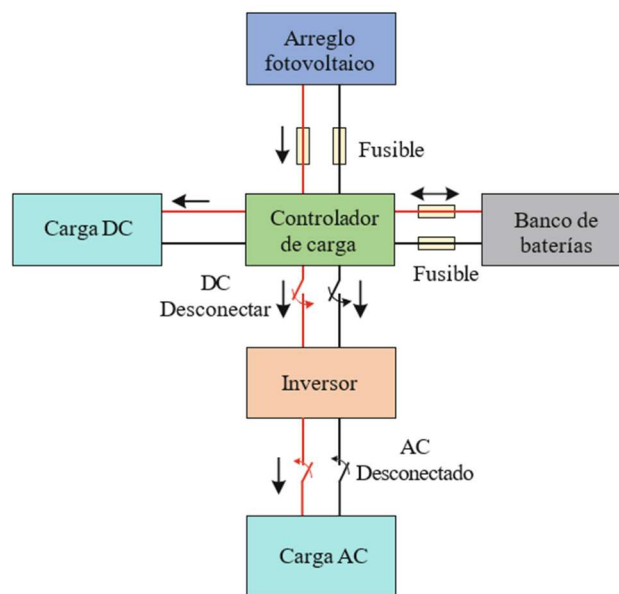


Figura 14. Sistema solar fotovoltaico aislado de la red con almacenamiento de batería.

Fuente: (Anitha et al., 2023)

Durante las horas de luz solar, el sistema fotovoltaico alimenta directamente a las cargas, mientras que el excedente de energía se almacena en las baterías para su uso posterior. De este modo, el BESS permite que las cargas conectadas funcionen incluso cuando los módulos solares no proporcionan la energía suficiente (Jing et al., 2019).

Un componente crucial del sistema es el controlador de carga o regulador de carga, ubicado entre los módulos solares y las baterías. Este dispositivo asegura que la potencia máxima del panel solar se dirija a la carga de las baterías sin causar daños por sobrecarga, y también evita que la batería se descargue excesivamente. En caso de que la batería tenga poca carga, el controlador la desconecta automáticamente de las cargas eléctricas (Syafiqah et al., 2020).

La Figura 14 también muestra un inversor, que se encarga de conectar los controladores de carga con las cargas de CA y regular la salida de potencia variable. Cabe destacar que los sistemas de CC independientes simples no requieren inversor, mientras que todos los sistemas de CA sí incorporan componentes adicionales como inversores, fusibles y cables específicos para la conexión (Hassan et al., 2022).

2.7.4 Baterías en sistemas fotovoltaicos híbridos

Estos se distinguen por su conexión a la red eléctrica y la integración de un BESS para almacenar energía como respaldo ante cortes inesperados. Esta configuración permite la carga de la batería utilizando tanto la energía de la red como la energía solar (Jing et al., 2019).

Un dispositivo de conmutación juega un papel fundamental al conectar la generación solar fotovoltaica a la red eléctrica. La carga de la batería se realiza cuando el sistema solar produce la mayor cantidad de energía, mientras que la descarga se lleva a cabo cuando la producción solar es baja o nula, o cuando la demanda de carga es alta (Najafi-Shad et al., 2020).

En el caso de modificar el sistema de la Figura 14 para convertirlo en un sistema conectado a la red, es necesario adicionar la salida de potencia de CA del inversor a la red pública.

2.7.5 Parámetros de la batería

La hoja de datos de una batería es una fuente crucial de información que describe sus características y capacidades. Para comprender mejor el comportamiento de la batería, es fundamental familiarizarse con los parámetros clave que se encuentran en ella.

En las siguientes secciones, se abordarán algunos de los parámetros más importantes que se pueden encontrar en la hoja de datos de una batería, con el objetivo de facilitar su comprensión y análisis.

Profundidad de descarga

La profundidad de descarga (DoD) es un parámetro fundamental que indica la cantidad de descarga de una batería en relación con su capacidad total. Este valor se expresa como un porcentaje y se calcula mediante la ecuación 3 (Wang et al., 2021).

$$DoD = \frac{\text{Cantidad de carga eliminada de la batería } [Q_d]}{\text{Cantidad máxima de carga disponible } [C]} * 100\% \quad (3)$$

Para ilustrar este concepto, se considera una batería con una capacidad de 1,25 kWh de energía. Si se han descargado 1,20 kWh, la DoD se calcula como $(1,20 / 1,25) * 100\% = 96\%$.

En términos más simples, la DoD es similar al porcentaje de batería que se observa en un teléfono o computadora portátil. Un porcentaje de batería bajo indica una DoD alta, lo que significa que la batería está descargada y retiene menos carga. La Figura 15 ilustra las curvas de descarga para baterías de plomo-ácido y de iones de litio, mostrando cómo la capacidad disponible varía en función del DoD (Hlal et al., 2019).

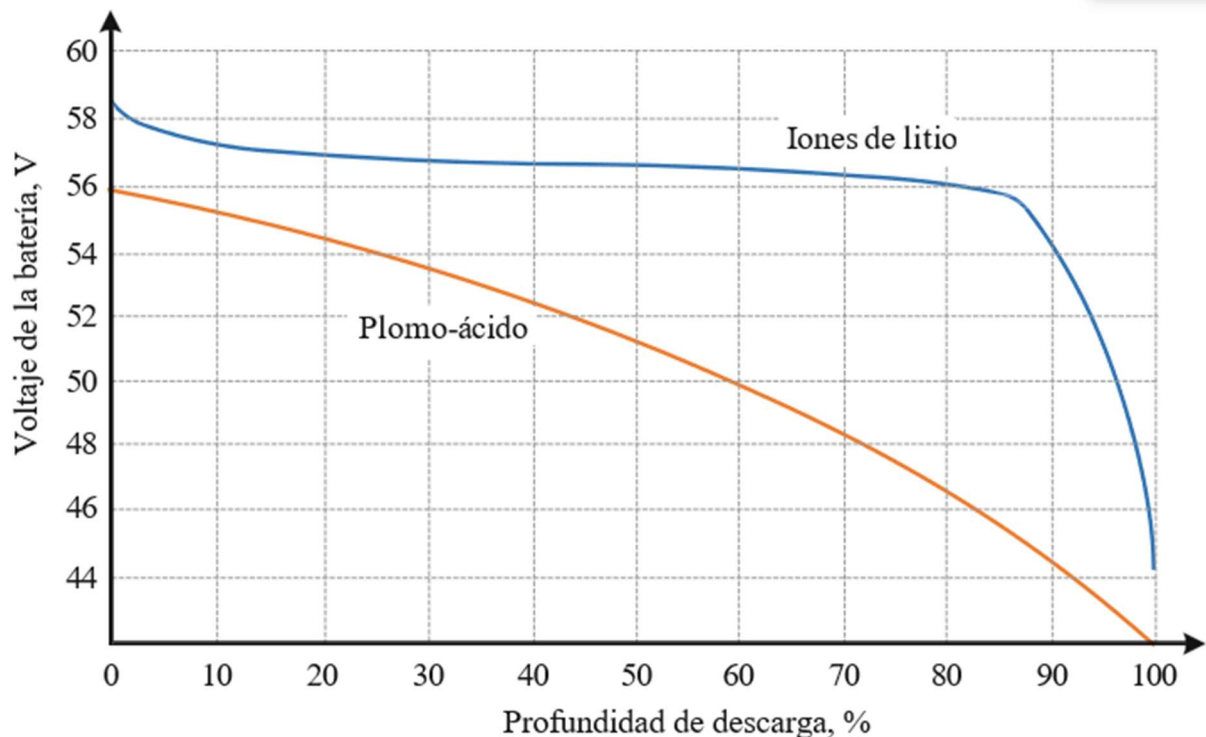


Figura 15. Curva de descarga comparativa de baterías LA y Li-ion. El voltaje de la batería disminuye con el aumento de DOD.

Fuente: (Hlal et al., 2019)

Estado de carga

Este es un indicador fundamental que refleja la cantidad de carga restante en una batería. Se expresa como un porcentaje, donde un 100% representa una batería completamente cargada y un 50% indica una carga media. De este modo, el SoC permite conocer el estado de la batería en cualquier momento de su vida útil (Sah & Kumar, 2023).

Su importancia radica en que facilita un control preciso del sistema, lo que a su vez se traduce en una mayor confiabilidad. El SoC se considera el opuesto al DoD (profundidad de

descarga) y se puede medir directamente mediante el porcentaje de batería que se muestra en un teléfono o una computadora portátil (Ji et al., 2019).

La Figura 16 ilustra de manera gráfica la relación entre el DoD y el SoC. A partir de la ecuación 4 se puede calcular el SoC. Sin embargo, para determinar la cantidad real de carga disponible, es necesario conocer la cantidad de descarga. En otras palabras, la carga disponible se calcula como la diferencia entre la carga inicial al 100% de SoC y la carga que se ha consumido durante la descarga (Jadhav & Patil, 2022).

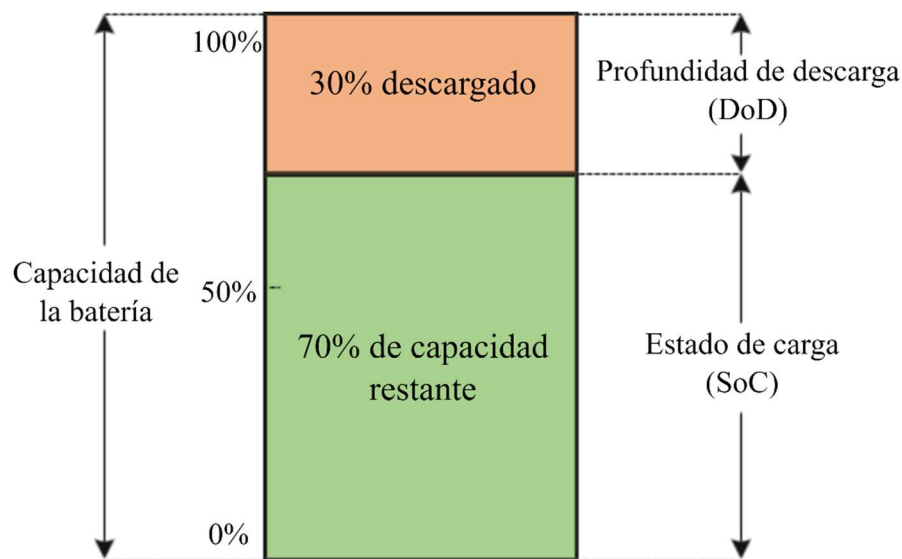


Figura 16. Relación inversa entre el SoC y el DoD de una batería.

Fuente: (Jadhav & Patil, 2022)

$$SoC = \frac{\text{Cantidad de carga disponible } [Q]}{\text{Cantidad máxima de carga disponible } [C]} * 100\% \quad (4)$$

$$SoC + DoD = 100\%$$

Tasa de descarga

Esta variable indica la velocidad a la que se vacía la batería con relación a su capacidad máxima. Se suele expresar como tasa C. Por ejemplo, una batería de 1 Ah con una tasa de descarga de 1 C proporcionaría 1 amperio (A) de corriente durante 1 hora (h) (Abbasi et al., 2020).

Continuando con el ejemplo, si la tasa de descarga fuese de 0,2 C, la batería proporcionaría 0,2 A o 200 miliamperios (mA) durante 5 horas. En cambio, una tasa de 2 C indicaría que la batería entrega 2 A durante 0,5 horas o 30 minutos (Fatullah et al., 2019).

En contraste, la tasa de carga se refiere a la cantidad de carga que se agrega a la batería por unidad de tiempo. Se expresa en número de horas, como se muestra en la ecuación 5 (Amir et al., 2022).

$$Tasa = \frac{Capacidad [Ah]}{Corriente [A]} \quad (5)$$

Tasa de autodescarga

Es un proceso natural e inevitable que afecta a todas las baterías, sin importar su tipo o tecnología. Se refiere a la pérdida gradual de capacidad eléctrica que experimenta una batería mientras permanece inactiva, sin ser utilizada. Este fenómeno se debe a reacciones electroquímicas internas que continúan consumiendo energía incluso cuando la batería no está conectada a ningún dispositivo (F. Hao et al., 2019).

La tasa de autodescarga, es decir, la velocidad a la que se pierde la carga depende de diversos factores. Uno de los más importantes es la temperatura ambiente: a mayor temperatura, mayor será la tasa de autodescarga. Esto se debe a que las reacciones electroquímicas se aceleran con el calor (Shan et al., 2022).

Otros factores que influyen en la tasa de autodescarga son (Zilberman et al., 2019):

- **El tipo de batería:** las baterías de litio, por ejemplo, tienen una tasa de autodescarga menor que las de plomo-ácido.
- **La corriente de carga:** una carga completa puede aumentar la tasa de autodescarga, mientras que una carga incompleta la reduce.
- **El estado de carga (SoC):** una batería con un SoC alto se autodescarga más rápido que una con un SoC bajo.

En general, la tasa de autodescarga se expresa como un porcentaje de la capacidad de la batería que se pierde cada mes. Por ejemplo, una tasa de autodescarga del 2% mensual significa que una batería completamente cargada perderá el 2% de su capacidad al cabo de un mes (Shen et al., 2019).

El tiempo de almacenamiento es el período durante el cual una batería puede mantener su carga sin perder una cantidad significativa de capacidad. Cuanto menor sea la tasa de autodescarga, mayor será el tiempo de almacenamiento (Zhou et al., 2022).

Es importante mantener la tasa de autodescarga lo más baja posible para alargar la vida útil de la batería. Se recomienda almacenar las baterías en un lugar fresco y seco, y mantenerlas parcialmente cargadas (Knap et al., 2021).

Ciclo de vida

Se define como el número de veces que puede completar un ciclo completo de carga y descarga antes de que su capacidad nominal se reduzca al 80% de su valor inicial. Si bien una batería puede seguir funcionando después de alcanzar este punto, su rendimiento se verá mermado. En este sentido, existen diversos factores que influyen en la duración del ciclo de vida, entre ellos se identifican (Chen et al., 2021):

- **Profundidad de descarga (DoD):** descargar la batería a un nivel más bajo (mayor DoD) en cada ciclo reduce su vida útil. Es recomendable mantener la DoD en un rango moderado para alargar la vida de la batería.
- **Velocidad de descarga:** descargar la batería a un ritmo más rápido también puede afectar negativamente a su ciclo de vida. Se recomienda realizar descargas a un ritmo moderado.
- **Temperatura:** las temperaturas extremas, tanto altas como bajas, pueden acortar la vida útil de la batería. Lo ideal es mantenerla en un ambiente con temperatura templada.

La Figura 17 ilustra la relación entre la capacidad de la batería y el número de ciclos para diferentes valores de DoD en una batería de plomo-ácido (LA). Se observa que a mayor DoD, menor es el número de ciclos que la batería puede soportar antes de perder el 20% de su capacidad original (H. Liu et al., 2020).

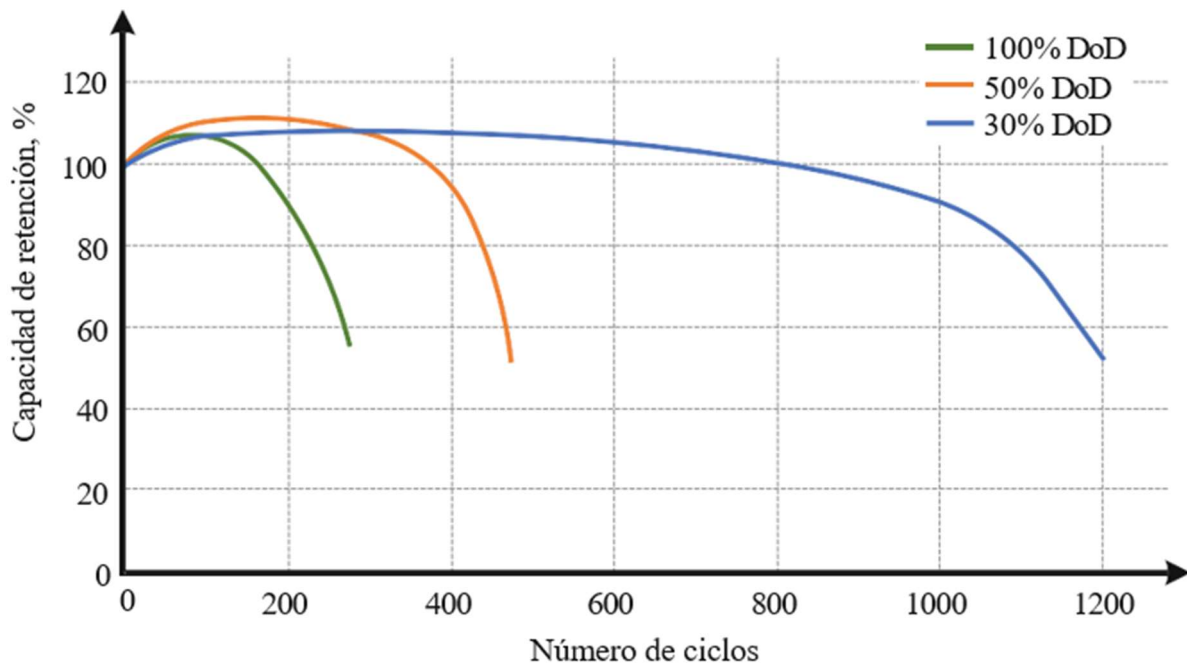


Figura 17. Relación entre capacidad de la batería, profundidad de descarga y ciclo de vida.

Fuente: (H. Liu et al., 2020)

Capacidad

En el corazón de un sistema solar fotovoltaico independiente reside la capacidad de la batería, la cual determina la cantidad de energía que puede almacenar para su uso posterior. Esta capacidad se mide en amperios-hora (Ah) y representa la carga máxima que la batería puede entregar en condiciones específicas (Peters et al., 2021).

Diversos factores influyen en la capacidad de la batería, como el voltaje de corte, la corriente de descarga y la temperatura. La tasa de descarga, indicada junto a la capacidad, define cómo se libera la energía. Una batería ideal de 100 Ah, por ejemplo, puede descargarse en 10 horas a 10 amperios, en 1 hora a 100 amperios o en 100 horas a 1 amperio (Madani et al., 2022).

La capacidad juega un rol crucial en el diseño del sistema fotovoltaico, determinando los días de autonomía. Un sistema grande requiere mayor capacidad de batería para mantener la energía durante períodos más largos. La elección de la capacidad nominal debe garantizar la autonomía deseada, considerando factores como la temperatura y el voltaje de corte (Sundaresan et al., 2022).

Consideración de dimensionamiento

El éxito de un sistema de almacenamiento fotovoltaico depende en gran medida del dimensionamiento adecuado de la batería. Un tamaño inapropiado puede ocasionar daños irreversibles a la batería, como descargas excesivas, voltajes inadecuados durante la carga o

una autonomía insuficiente. Para optimizar el rendimiento y la vida útil de la batería, es crucial determinar la capacidad precisa requerida para cada aplicación (Torre et al., 2019).

La autonomía y las características de carga son dos factores determinantes en la capacidad de la batería. La autonomía se refiere al tiempo que la batería puede proporcionar energía sin necesidad de recarga, mientras que las características de carga se relacionan con la velocidad y la eficiencia del proceso de carga (Zhu et al., 2020).

Selección de voltaje apropiado

En ausencia de un convertidor CC/CC dentro del sistema, la selección del voltaje adecuado se define por el voltaje nominal de la carga, a la que se suma el voltaje nominal del conjunto fotovoltaico. Este factor determina la cantidad de celdas o unidades que deben conectarse en serie (Pillai et al., 2022).

Definición de DoD máximo

En el ámbito de las baterías, el DoD máximo (Profundidad de Descarga Máxima) se define como el porcentaje de descarga permitido para cada tipo de batería, en función de su modo de funcionamiento. Este parámetro juega un papel crucial en la vida útil de la batería, ya que determina la cantidad de energía que se puede extraer de ella antes de que se degrade significativamente (Cheng et al., 2020).

Para las baterías de plomo-ácido, la DoD máxima se establece generalmente en un 80%. Esto significa que la batería no debe descargarse por debajo del 20% de su capacidad total. El DoD diario máximo, por otro lado, puede establecerse de forma arbitraria o calcularse en función del ciclo diario conocido, la vida útil esperada de la batería y la vida útil deseada (Harold et al., 2023).

En el caso del almacenamiento estacional de energía, también es necesario establecer un DoD máximo. Si una batería de plomo-ácido no se carga completamente durante varias semanas, se recomienda no descargarla a más del 30% de su capacidad (Hlal et al., 2019).

Es importante destacar que la DoD máxima no es un valor único e inmutable. Puede variar según el tipo de batería, el fabricante, las condiciones de funcionamiento y los requisitos específicos de la aplicación. Por lo tanto, es fundamental consultar la documentación del fabricante para determinar el DoD máximo recomendado para cada caso particular (Khan et al., 2022).

Determinación del ciclo de trabajo

Conforme a lo establecido por la norma IEEE Std 485-2020, el ciclo de trabajo se define como la secuencia de cargas que se espera que una batería suministre durante períodos de

tiempo específicos. Esta secuencia, intrínsecamente variable según la aplicación, debe ser determinada desde el inicio del proceso de dimensionamiento de la batería (Moy et al., 2021).

Diversos factores influyen en el ciclo de trabajo, entre los que se encuentran la duración del ciclo, las tasas de carga y descarga, la profundidad de la descarga y el tiempo en modo de espera. El conocimiento preciso de estos parámetros en un instante determinado permite estimar el estado de la batería (Akbar & Rohman, 2020).

Energía total requerida

El cálculo de la energía total necesaria para la batería implica estimar la integral de la potencia suministrada, considerando además la eficiencia de conversión energética del sistema de almacenamiento de energía (η_{BESS}). No obstante, para prever incrementos súbitos en la demanda de carga y las posibles pérdidas del sistema, se recomienda incluir un margen adicional de capacidad. Por lo tanto, se suma un 10% a la energía total calculada utilizando la ecuación 6 (Thomitzek et al., 2019).

$$E_{total-requerida} [Wh] = \frac{110\%}{\eta_{BESS}} \int_0^{24} (P_{demanda} - P_{suministrada}) dt \quad (6)$$

Dimensionamiento del conjunto de baterías

El dimensionamiento de la pila de baterías implica la organización de celdas en módulos para alcanzar los niveles de capacidad y voltaje requeridos. Una celda, que tiene un voltaje que varía entre 1,2 y 4,2 V, constituye la unidad básica y compacta de una batería. Estas celdas se disponen en serie o en paralelo para formar un módulo de batería, permitiendo así obtener la capacidad y el voltaje adecuados. La conexión en serie se emplea para incrementar el voltaje, mientras que la conexión en paralelo se utiliza para aumentar la corriente. El voltaje de salida de un módulo está determinado por la ecuación 7 (Bangun et al., 2019).

$$Voltaje\ terminal = voltaje\ de\ celda\ única \times número\ de\ celdas\ en\ serie \quad (7)$$

La capacidad en amperios-hora (Ah) de una serie de celdas es equivalente a la de una sola celda, sin embargo, el voltaje de la serie es la suma de los voltajes individuales de las celdas. Si la capacidad requerida en Ah excede la capacidad disponible del módulo de batería, es necesario conectar múltiples series similares en paralelo para aumentar la capacidad.

Como resultado, la capacidad total en Ah del módulo de batería está determinada por la ecuación 8 (Shin & Roh, 2020).

$$Ah \text{ capacidad} = Ah \text{ capacidad de una sola cadena} * \text{número de cadenas paralelas} \quad (8)$$

2.8 Sistema de generación eólica

El sistema de generación eólica se basa en la transformación de la energía cinética del viento en energía mecánica y luego en energía eléctrica mediante aerogeneradores, tal como se observa en la Figura 18 (Ganthia et al., 2021).

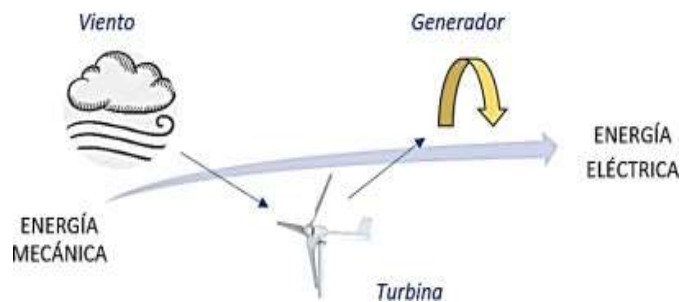


Figura 18. Conversión de energía mecánica a eléctrica.

Fuente: (Ganthia et al., 2021).

Existen aerogeneradores de eje horizontal y vertical, los primeros contienen en palas o álabes montados en un eje horizontal, que se mueven con la fuerza del viento, accionando un generador eléctrico; tal como se observa en la Figura 19. Además, presenta las siguientes características (Salas & Jiménez, 2017):

- Generalmente cuentan con un mecanismo de orientación que les permite girar y enfrentar la dirección del viento para maximizar la captación de energía.
- Tienen una alta eficiencia en la conversión de energía del viento debido a su capacidad para operar en velocidades de viento más altas.
- Pueden construirse en una variedad de tamaños, desde pequeñas turbinas para uso doméstico hasta grandes instalaciones para parques eólicos.
- Suelen requerir una mayor altura para situar las palas lejos del suelo, aprovechando mejor las corrientes de viento a altitudes más elevadas.



Figura 19. Aerogeneradores de eje horizontal

Fuente: (Salas & Jiménez, 2017).

Los aerogeneradores de eje horizontal tienen diversas aplicaciones que van desde la generación de energía a gran escala hasta usos más locales y residenciales. Son una pieza clave en parques eólicos tanto en tierra (onshore) como en el mar (offshore), donde desempeñan un papel crucial en la producción de energía eléctrica a gran volumen. En una escala más reducida, estos aerogeneradores también se utilizan para suministrar energía a hogares, granjas y pequeñas empresas, siendo especialmente valiosos en áreas rurales o remotas donde el acceso a la red eléctrica puede ser limitado o inexistente. Además, estos sistemas a menudo se integran en la red eléctrica más amplia, contribuyendo significativamente al suministro de energía renovable y ayudando a reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Esta versatilidad hace que los aerogeneradores de eje horizontal sean fundamentales en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y ecológicas (Alfaro et al., 2023).

Los aerogeneradores de eje vertical son una categoría de turbinas eólicas donde el eje principal de rotación se sitúa perpendicular al suelo. A diferencia de los aerogeneradores de eje horizontal, su orientación les permite captar viento desde cualquier dirección sin necesidad de mecanismos de orientación. Además, presenta las siguientes características (Alave-Vargas et al., 2022):

- Pueden captar viento de cualquier dirección, lo que los hace ideales para áreas con vientos cambiantes y turbulencias.
- Generalmente son más bajos que los aerogeneradores de eje horizontal, lo que facilita su mantenimiento y los hace menos intrusivos visualmente.
- Suelen ser menos eficientes en comparación con los de eje horizontal y operan a velocidades de viento más bajas.
- Tienen un diseño más robusto y requieren menos componentes mecánicos, lo que puede resultar en una mayor durabilidad y menor mantenimiento.

Los tipos de aerogeneradores pueden ser los siguientes (Díaz Rocano & Toapanta Chicaiza, 2020):

Darrieus: tienen un diseño que se asemeja a una batidora de huevos, con palas curvas que se extienden desde la parte superior a la inferior del eje. Son eficientes, pero carecen de capacidad de autoarranque.

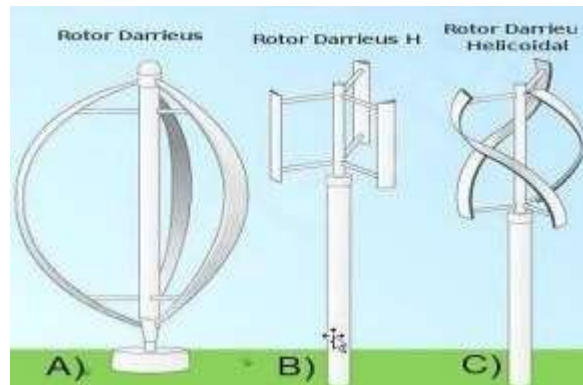


Figura 20. Aerogenerador Darrieus

Fuente: (Díaz Rocano & Toapanta Chicaiza, 2020).

Savonius: se basan en dos semicilindros colocados alrededor del eje. Son conocidos por su buen autoarranque y su funcionamiento a bajas velocidades del viento.



Figura 21. Aerogeneradores Savonius

Fuente: (Díaz Rocano & Toapanta Chicaiza, 2020)

Híbridos (Darrieus-Savonius): combinan elementos de ambos diseños para mejorar la eficiencia y la capacidad de autoarranque.



Figura 22. Aerogenerador híbrido de eje vertical

Fuente: (Díaz Rocano & Toapanta Chicaiza, 2020)

Los aerogeneradores de eje vertical son especialmente adecuados para la generación de energía en entornos urbanos y suburbanos gracias a su capacidad de funcionar eficientemente bajo condiciones de viento turbulento y su diseño compacto. Estas características los hacen ideales también para aplicaciones residenciales y en pequeñas empresas, donde pueden ser utilizados para la generación de energía a pequeña escala. Además, debido a su diseño único y características de funcionamiento, estos aerogeneradores se emplean frecuentemente en instalaciones experimentales y educativas, sirviendo como herramientas valiosas para el estudio y la enseñanza de las energías renovables. Su versatilidad y eficiencia los hacen adecuados para una amplia gama de aplicaciones, desde la generación de energía a nivel local hasta su uso como recurso didáctico (Alave-Vargas et al., 2022).

CAPÍTULO 3

3 MODELADO MATEMÁTICO

En esta sección, se presenta la modelación matemática de un sistema híbrido que combina tecnologías fotovoltaicas y eólicas. Para llevar a cabo este análisis, se emplean ecuaciones específicas que permiten simular y evaluar la generación de energía tanto de los paneles solares como de las turbinas eólicas. Basándose en datos históricos de velocidad del viento y de irradiancia solar, así como en el perfil de carga y las tecnologías implementadas, se derivan las curvas características de cada componente del sistema. Finalmente, se calculan los despachos de potencia y la energía generada por el sistema híbrido, lo que posibilita una evaluación detallada de su rendimiento y viabilidad.

3.1 Análisis de la generación de energía fotovoltaica

En una superficie inclinada, la radiación solar se divide en tres componentes fundamentales: radiación directa, radiación dispersa y radiación reflejada (Qi et al., 2020). La radiación directa representa la energía solar que llega desde el sol sin ninguna desviación. La radiación dispersa, por otro lado, es la energía solar que ha sido dispersada por moléculas y partículas en la atmósfera, alcanzando la superficie desde varias direcciones. Por último, la radiación reflejada corresponde a la parte de la energía solar que rebota en el suelo y otras superficies antes de incidir en la superficie inclinada.

$$G = G_b R_b + G_d R_d + \rho G_h R_g \quad (9)$$

$$R_b = \frac{[(\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) \cos \delta \cos \omega + (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma) \sin \delta + \sin \beta \sin \gamma \cos \delta \sin \omega]}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (10)$$

$$R_d = K_t R_b + \frac{1}{2} (1 - K_t) (1 + \cos \beta) \quad (11)$$

$$R_g = K_t R_b + \frac{1}{2} (1 - K_t) (1 + \cos \beta) \quad (12)$$

En el plano horizontal, se encuentran tres tipos de radiación solar: la directa (G_b), la dispersa (G_d) y la total (G_h). El coeficiente de reflexión del suelo se denota como ρ . Los coeficientes proporcionales del plano inclinado y del plano horizontal son R_b , R_d y R_g . El

ángulo de inclinación (β) es la medida entre el plano horizontal y el plano inclinado, mientras que el ángulo de dirección (γ) indica el ángulo entre la normal del plano inclinado y la dirección sur, siendo 0° al sur, positivo al oeste y negativo al este. La latitud (ϕ) es positiva en el hemisferio norte y negativa en el hemisferio sur. El ángulo horario (ω) se mide en grados (15° por hora), con 0° al mediodía, valores negativos por la mañana y positivos por la tarde. La declinación solar se representa con δ . La transmitancia de radiación dispersa (K_t) se define como la relación entre G_d y G_h . Finalmente, G_0 es la radiación solar en el límite superior de la atmósfera. Por su parte, Deceased & Beckman (2020) presentaron las siguientes ecuaciones para estimar la declinación solar (δ) y la ecuación de corrección del tiempo (A).

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) [0.06918 - 0.399912 * \cos A + 0.070257 * \sin A - 0.006758 * \cos 2A + 0.000907 * \sin 2A - 0.002697 * \cos 3A + 0.0001480 * \sin 3A] \quad (13)$$

$$A = \frac{229.2(0.000075 + 0.001868 * \cos A - 0.032077 * \sin A - 0.014615 * \cos 2A + 0.04089 * \sin 2A)}{360} \quad (14)$$

$$\omega = \left(\frac{Z - 1}{365}\right) * 360 \quad (15)$$

$$T_{corr} = T_{az} + \frac{I_{az} - I_{Lm}}{15} + \frac{A}{60} \quad (16)$$

$$\Theta = 15 * (T_{corr} - 12) \quad (17)$$

En este contexto, Z representa el día del año. La hora local de la zona horaria se denota como T_{az} . El ángulo solar se identifica con Θ . La latitud estándar se expresa como I_{az} , I_{Lm} corresponde a la longitud de la latitud. Además, I_{Lm} es el meridiano estándar correspondiente a la zona horaria local.

$$\sin \delta = \sin h * \sin \varphi + \cos h * \cos \varphi * \cos \omega \quad (18)$$

$$\sin I = \cos h * \sin \omega / \cos h \quad (19)$$

En este sentido, δ es el ángulo de altitud solar ($^\circ$); φ es la latitud del lugar; I es el ángulo solar ($^\circ$). Dado que casi no hay interferencia en el límite superior de la atmósfera, la radiación solar

en el límite superior se puede obtener corrigiendo el ángulo de incidencia de la constante solar

Dado que casi no hay interferencia en el límite superior de la atmósfera, la radiación solar en el límite superior se puede obtener corrigiendo el ángulo de incidencia de la constante solar E_0 .

$$G_0 = E_0[1 + 0.033 * \cos 0.017202n] * \sin \theta \quad (20)$$

En este sentido, θ es el ángulo de incidencia del sol. El valor recomendado de la constante solar E_0 de la Organización Meteorológica Mundial (WMO) en 1981 es 1367 W/m^2 , y n representa el n -ésimo día del año. Por otro lado, La salida anual de PVs E_p se puede calcular mediante la siguiente expresión.

$$E_p = G_0 * \frac{C}{E_s} * K \quad (21)$$

Es así como, C es la capacidad fotovoltaica de los paneles solares desplegados en la carretera. K es la relación de rendimiento del panel solar (usualmente el valor es 0.78), E_s es la condición de prueba estándar de los fotovoltaicos, cuyo valor es 1000 W/m^2 .

3.2 Análisis de la generación de energía de la turbina eólica

Para pequeñas turbinas eólicas, la fórmula de cálculo de la potencia diaria es la siguiente:

$$E_w = E_1 + E_2(v_m \leq v_i/v_T) \quad (22)$$

$$E_1 = \sum P_N h_i(v_i/v_H)(v_i \leq v_m/v_H) \quad (23)$$

$$E_2 = P_N \sum h_i(v_i \leq H/v_T) \quad (24)$$

En este sentido, E_w es la cantidad de generación de energía en un cierto día; E_1 y E_2 son la generación de energía de las turbinas eólicas a diferentes velocidades del viento; v_i , v_H y v_T son la velocidad del viento en un cierto momento, la velocidad de inicio del viento y la velocidad de apagado del viento de una turbina eólica, respectivamente; P_N es la potencia nominal de la turbina eólica; h_i es el número de horas correspondientes a v_i en el día.

Por lo tanto, la generación diaria de energía del sistema híbrido eólico-solar E_{total} se puede calcular mediante la siguiente expresión.

$$E_{total} = E_{si} + E_w \quad (25)$$

3.3 ANÁLISIS DE POTENCIAL EÓLICO

3.3.1 Zona de estudio.

La zona de estudio para el diseño del sistema híbrido eólico/fotovoltaico de alumbrado público se extiende desde el control sur hasta la bomba de gasolina Chaullabamba (ver Figura 23). Las coordenadas geográficas de estos puntos se detallan en la Tabla 2. Esta área comprende un tramo de la vía rápida Cuenca-Azogues, donde se pretende desarrollar el diseño del sistema híbrido utilizando las luminarias LED ya existentes. El enfoque del estudio se centra en el diseño del sistema sin considerar su implementación práctica en el terreno. Las coordenadas mencionadas delimitan específicamente el alcance geográfico del estudio, asegurando una evaluación precisa de las condiciones locales tanto para la energía eólica como fotovoltaica.

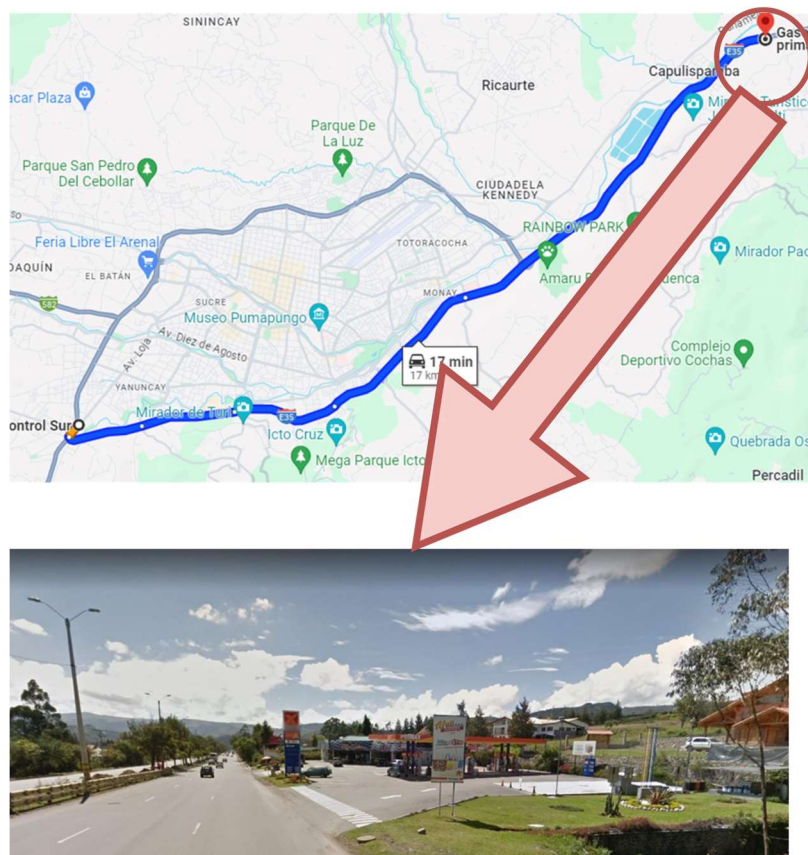


Figura 23. Carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.

Fuente: (Google Maps, 2024)

Tabla 2. Coordenadas Geográficas de la Zona de Estudio

Punto	Coordenadas
Control Sur	(-2.9225398682109707, -79.03834532933013)
Bomba de gasolina Chaullabamba	(-2.8484761829364524, -78.91955565321747)

Fuente: Autor

3.4 Caracterización de carga

La carga del sistema de alumbrado público en el tramo de estudio de la vía Cuenca-Azogues se centró en las luminarias LED existentes. Estas luminarias, de 150W de potencia cada una, estaban distribuidas a lo largo de ambos sentidos de la carretera, tanto en la vía de ida como en la de regreso. Según la información disponible (CENTROSUR, 2023), el tramo de la vía Cuenca-Azogues cuenta con un total de 1890 luminarias LED instaladas. Este número de luminarias se utilizó para determinar la carga energética total del sistema de alumbrado público en la zona de estudio. Las luminarias, distribuidas uniformemente, proporcionan una iluminación adecuada en ambos sentidos del tráfico, lo cual es esencial para la seguridad vial nocturna.

La carga energética total se calculó de la siguiente manera (ver Ecuación 24): el número de luminarias era 1890 y la potencia de cada luminaria era 150W, resultando en una carga total de 283,500W o 283.5kW. Esta distribución y caracterización de la carga permitieron realizar un diseño preciso del sistema híbrido eólico/fotovoltaico, asegurando que se cumplieran las necesidades energéticas del alumbrado público a lo largo de este tramo de la carretera.

$$Carga_{Total} = N_{Luminarias} * Potencia_{Luminarias} \quad (26)$$
$$Carga_{Total} = 1890 * 150 W = 283.5 kW$$

3.5 Energía consumida asociada a la carga

La energía consumida asociada a la carga del sistema de alumbrado público en el tramo de estudio de la vía Cuenca-Azogues se calculó considerando las luminarias LED de 150W de potencia. Estas luminarias operan 12 horas seguidas al día, lo cual implica un uso continuo durante la noche. La ecuación 25 permite determinar la energía consumida diariamente por una luminaria.

$$E_{diaria} = Potencia_{luminaria} * tiempo_{funcionamiento} \quad (27)$$

$$E_{diaria} = 150 W * 12 h = 1800 Wh = 1.8 kWh$$

Con un total de 1890 luminarias en el tramo de estudio, la energía diaria consumida por todas las luminarias se calculó utilizando la Ecuación 26. Por otro lado, para calcular la energía consumida mensualmente, se utilizó la Ecuación 27. De manera similar, para obtener la energía consumida anualmente, se empleó la Ecuación 28.

$$E_{diaria\ total} = E_{diaria} * Número_luminarias \quad (28)$$

$$E_{diaria\ total} = 1.8 kWh * 1890 = 3402 kWh$$

$$E_{mensual} = E_{diaria\ total} * 30 \quad (29)$$

$$E_{mensual} = 3402 kWh * 30 = 102060 kWh$$

$$E_{anual} = E_{diaria\ total} * 365 \quad (30)$$

$$E_{anual} = 3402 kWh * 365 = 1241730 kWh$$

El alto consumo energético reflejado en estos valores (ver Tabla 3) subraya la necesidad de un diseño eficiente del sistema híbrido eólico/fotovoltaico. La capacidad del sistema híbrido debe ser suficiente para cubrir estos requerimientos energéticos de manera constante y sostenible. Además, la generación de energía renovable debe ser optimizada para reducir la dependencia de fuentes no renovables y minimizar los costos operativos.

Tabla 3. Energía consumida asociada a la carga – sistema de iluminación Cuenca - Azogues

Periodo	Energía Consumida (kWh)
Diario	3402
Mensual	102060

Anual	1241730
-------	---------

Fuente: Autor

3.6 Caracterización del recurso eólico y solar

El análisis de las fuentes eólico y solar, en el tramo de estudio de la vía Cuenca-Azogues, fue fundamental para el diseño del sistema híbrido eólico/fotovoltaico. Los datos del recurso eólico, como la velocidad del viento, se obtuvieron de la plataforma atlas eólico mundial, que proporcionó información detallada sobre las condiciones eólicas en diversas regiones. Esta plataforma permitió acceder a datos históricos y actuales sobre la velocidad del viento, lo cual fue crucial para determinar la viabilidad y eficiencia de las turbinas eólicas en el área de estudio.

Por otro lado, el recurso solar se caracterizó por la irradiancia solar, que se obtuvo del atlas solar mundial. Esta herramienta proporcionó datos precisos sobre la cantidad de radiación solar que incidía en la superficie terrestre en el área de estudio. La irradiancia media diaria en la vía Cuenca-Azogues se estimó favorable para la generación de energía fotovoltaica. Por lo que, estos datos permitieron dimensionar los paneles solares de manera eficiente, asegurando un rendimiento óptimo durante todo el año.

3.6.1. Análisis del recurso eólico

El análisis de la fuente eólica en el tramo de estudio de la vía Cuenca-Azogues se realizó ubicando dos puntos estratégicos. El primer punto se situó en las coordenadas -2.848990530653579, -78.9190406841845, correspondiente a la Bomba de gasolina Chaullabamba. El segundo punto se localizó en las coordenadas -2.9225398682109707, -79.03834532933013, correspondientes al Control Sur. Estos puntos sirvieron de referencia para delinear el área de estudio.

Posteriormente, se dibujó toda el área alrededor de la carretera, desde el Control Sur hasta la Bomba de gasolina Chaullabamba. Este proceso enmarcó únicamente la carretera Cuenca-Azogues, asegurando que los datos recolectados fueran representativos de las condiciones eólicas a lo largo de este tramo (ver Figura 24).

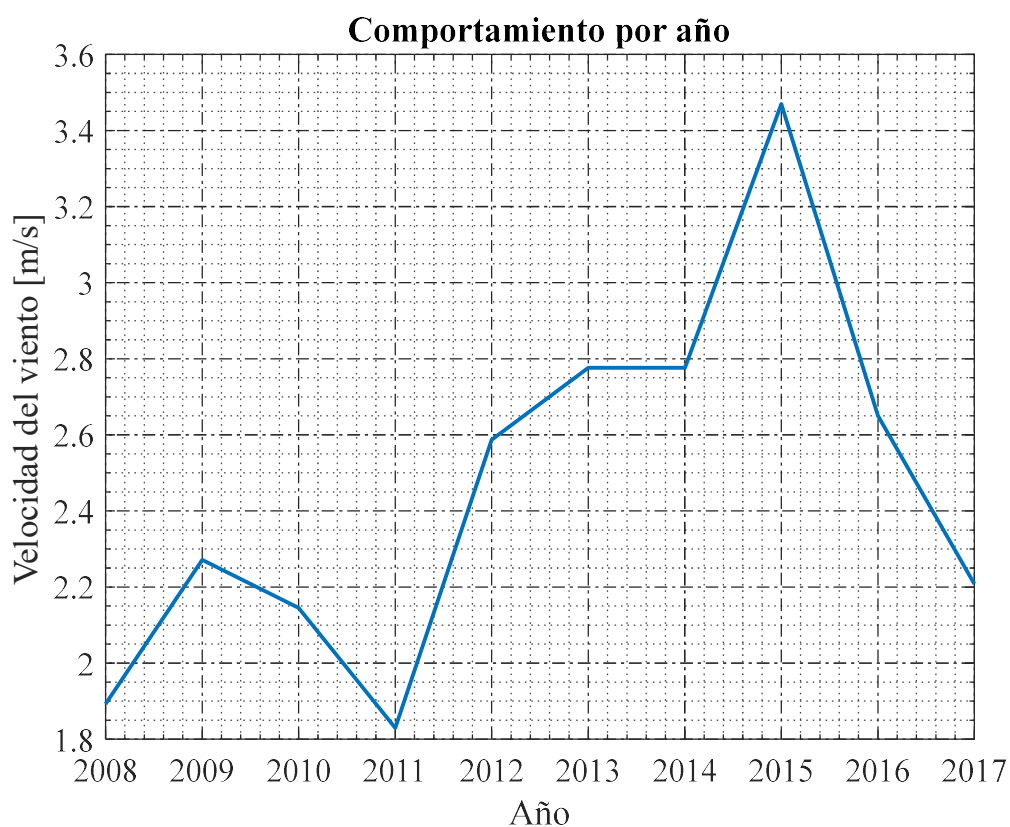


Figura 25. Comportamiento del viento por año en carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.

Fuente: (DTU Wind Energy & World Bank Group, 2024)

Tabla 4. Análisis del comportamiento del viento por año – autopista Cuenca - Azogues

Estadística	velocidad del viento
Número de años	10
Media	2.46 m/s
Desviación estándar	0.49 m/s
Valor mínimo	1.83 m/s
Percentil 25%	2.16 m/s
Percentil 50%	2.42 m/s
Percentil 75%	2.74 m/s
Valor máximo	3.47 m/s

Fuente: Autor

El análisis de la tendencia en la velocidad del viento anualmente muestra una variabilidad significativa, con un aumento general a lo largo de los años. Desde 2008 hasta 2017, la velocidad del viento parece aumentar de manera constante, alcanzando un pico en 2015 con 3.47 m/s. Este patrón puede estar influenciado por cambios climáticos o alteraciones en las condiciones atmosféricas locales a lo largo de los años. Las fluctuaciones en la velocidad del viento podrían ser resultado de factores naturales como el calentamiento global, que puede afectar los patrones de viento de la región.

En cuanto al comportamiento anual, se observa una variación en la velocidad del viento a lo largo de los años, con ciertos picos en los años 2012, 2013 y especialmente en 2015. Estos picos podrían indicar años con condiciones climáticas excepcionales o cambios en la topografía local que afectan la velocidad del viento. Después de 2015, la velocidad del viento disminuye ligeramente, pero sigue siendo elevada en comparación con los años anteriores a 2012. Este análisis es esencial para comprender y predecir las condiciones del viento a largo plazo en la región, lo que puede influir en la planificación de actividades y en la implementación de medidas de adaptación al cambio climático.

3.6.3. Análisis del recurso eólico mensual

Para el análisis del comportamiento del viento por mes, se emplearon datos de velocidad del viento registrados mensualmente en la vía rápida Cuenca - Azogues. Primero, se calcularon las estadísticas descriptivas, incluyendo la media, la desviación estándar, y los percentiles, para comprender la variabilidad y distribución de los datos (ver Tabla 5). Además, se utilizó una gráfica de línea para visualizar las tendencias a lo largo del tiempo (ver Figura 26). Los picos y cambios observados en la velocidad del viento se analizaron para identificar posibles influencias climáticas. Este enfoque permitió detectar un aumento general en la velocidad del viento, con un pico notable en julio.

La velocidad media del viento registrada mensualmente es aproximadamente 2.42 m/s, indicando una velocidad de viento moderada. La desviación estándar es de 0.68 m/s, lo que sugiere una variabilidad considerable en las velocidades del viento a lo largo del año. La velocidad mínima registrada es de 1.83 m/s, mientras que la máxima alcanza los 3.47 m/s. Los percentiles muestran que el 25% de las velocidades del viento están por debajo de 2.02 m/s, la mediana (50%) está en 2.10 m/s, y el 75% de los valores están por debajo de 3.25 m/s, lo que refleja una distribución amplia de los datos.

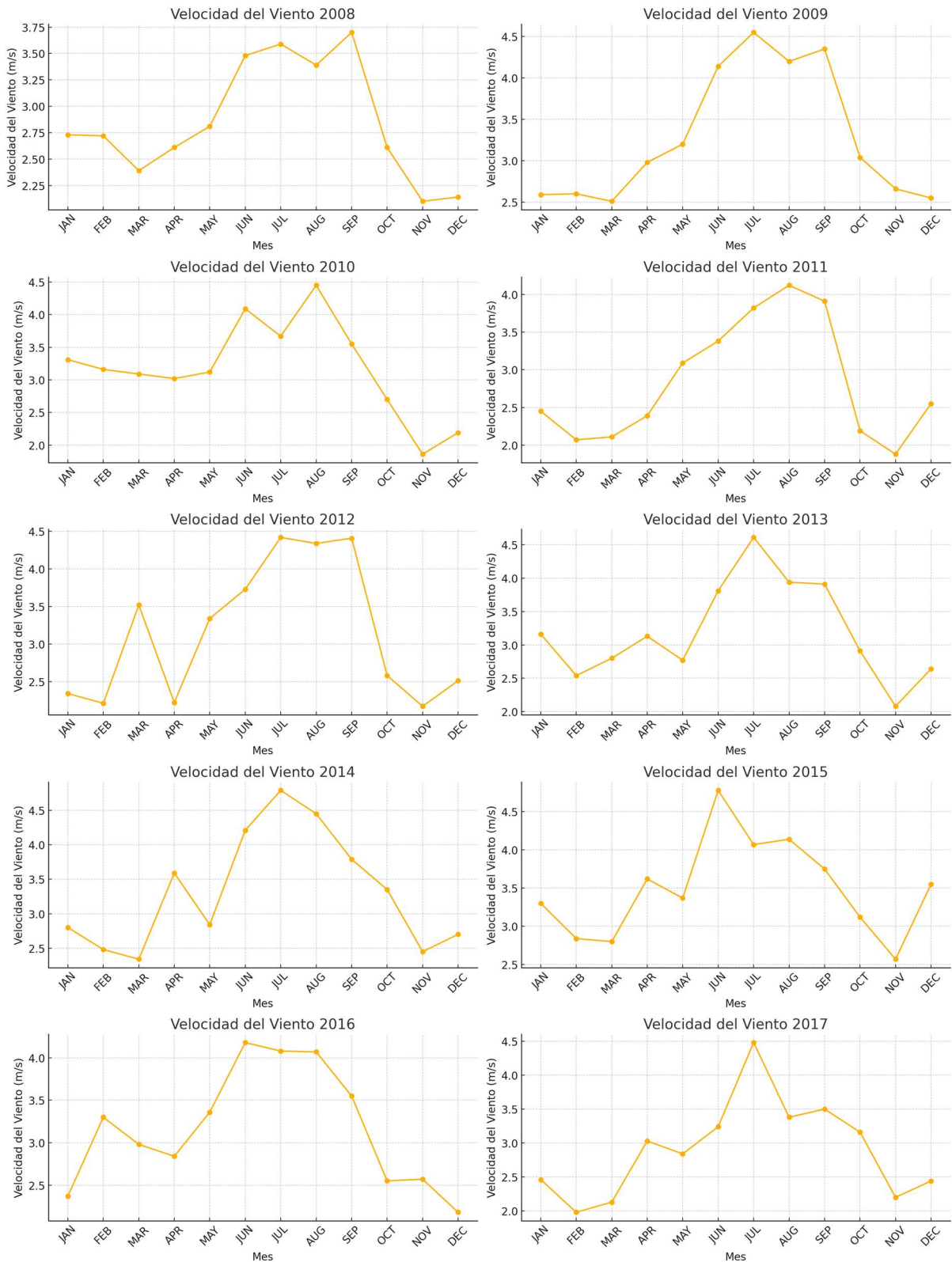


Figura 26. Comportamiento del viento por mes en carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.

Fuente: (DTU Wind Energy & World Bank Group, 2024)

Tabla 5. Análisis del comportamiento del viento por mes – autopista Cuenca - Azogues

Estadística	Valor
Número de meses	12
Media	2.42 m/s
Desviación estándar	0.68 m/s
Valor mínimo	1.83 m/s
Percentil 25%	2.02 m/s
Percentil 50%	2.10 m/s
Percentil 75%	3.25 m/s
Valor máximo	3.47 m/s

Fuente: Autor

El análisis de la tendencia mensual de la velocidad del viento revela una variabilidad significativa a lo largo del año. Los meses con mayores velocidades del viento son junio (3.04 m/s), julio (3.47 m/s), y agosto (3.25 m/s). Este patrón sugiere que los meses de mitad de año experimentan mayores velocidades de viento, probablemente debido a factores climáticos estacionales y variaciones en las condiciones atmosféricas. Las fluctuaciones observadas en la velocidad del viento podrían estar influenciadas por cambios en la temperatura y presión atmosférica durante diferentes épocas del año.

En cuanto al comportamiento mensual, se observa que la velocidad del viento aumenta gradualmente desde el inicio del año, alcanzando su pico máximo en julio. Después de julio, la velocidad del viento disminuye, alcanzando su valor mínimo en noviembre y diciembre con 1.83 m/s. Este patrón sugiere una dinámica estacional en la que los meses de verano tienen mayores velocidades de viento debido al incremento de la actividad térmica y otros factores climáticos. Este análisis proporciona información esencial para comprender y predecir las condiciones del viento a lo largo del año, lo que es crucial para la planificación de actividades y la implementación de medidas de adaptación en la región.

3.6.4. Análisis del recurso eólico diario

Para el análisis del comportamiento del viento por día, se emplearon datos horarios de velocidad del viento registrados en la vía rápida Cuenca - Azogues. Primero, se calcularon las estadísticas descriptivas, tales como la media, la desviación estándar, y los percentiles, con

el fin de comprender la variabilidad y distribución de los datos diarios (ver Tabla 6). Además, se utilizó una gráfica de línea para visualizar las tendencias a lo largo del día (ver Figura 27). Los picos y valles observados en la velocidad del viento se analizaron para identificar posibles influencias atmosféricas. Este enfoque permitió detectar un aumento general en la velocidad del viento durante las horas de la tarde.

La media de la velocidad del viento registrada es de aproximadamente 2.52 m/s. Esto indica que, en promedio, la velocidad del viento es moderada en la región estudiada. La desviación estándar es de 0.65 m/s, lo que sugiere una variabilidad moderada en los datos de velocidad del viento, indicando fluctuaciones diarias. La velocidad mínima registrada es de 1.83 m/s, mientras que la máxima alcanza los 3.47 m/s. Además, los percentiles muestran que el 25% de las velocidades del viento están por debajo de 1.88 m/s, la mediana (50%) está en 2.37 m/s, y el 75% de los valores están por debajo de 3.14 m/s, reflejando la distribución general de los datos.

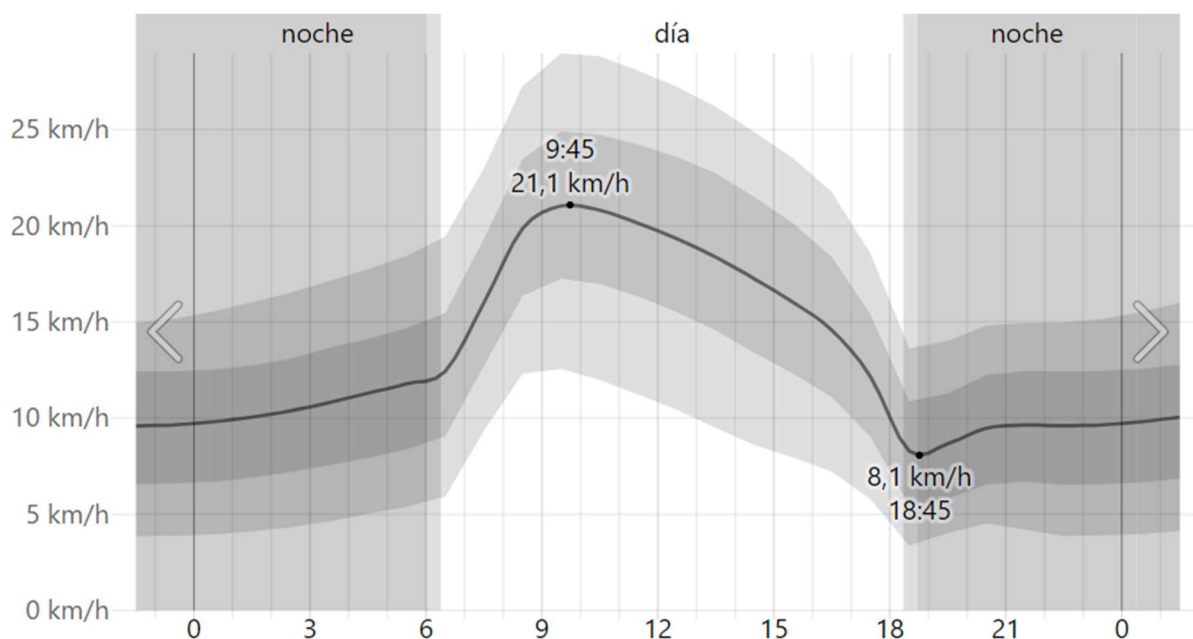


Figura 27. Comportamiento del viento diario en carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.

Fuente: (DTU Wind Energy & World Bank Group, 2024)

En cuanto al comportamiento diario, los datos muestran que, durante las primeras horas del día, la velocidad del viento aumenta progresivamente hasta alcanzar un máximo alrededor de la hora 9:45 am. De forma posterior, la velocidad del viento comienza a decrecer, hasta alcanzar su punto mínimo alrededor de las horas 18:45 pm. Este patrón sugiere una dinámica diaria donde el calentamiento solar influye en la velocidad del viento, con el viento

disminuyendo durante la tarde debido al incremento de la actividad térmica. Este conocimiento es esencial para entender y predecir las condiciones del viento en la región, impactando actividades locales y planificación.

El análisis de la tendencia de la velocidad del viento, utilizando una media móvil de 3 horas, revela una variabilidad significativa en el rango de 1.83 m/s a 3.47 m/s. Este enfoque de la media móvil suaviza las fluctuaciones diarias, proporcionando una visión más clara de la tendencia general. A lo largo del día, se observa que la velocidad del viento tiende a aumentar progresivamente, alcanzando su punto máximo en las horas de la tarde. Este patrón puede estar influenciado por factores atmosféricos locales, como la temperatura y la presión, que varían durante el día.

Tabla 6. Análisis del comportamiento del viento por día – autopista Cuenca - Azogues

Estadística	Valor
Número de días	24
Media	2.52 m/s
Desviación estándar	0.65 m/s
Valor mínimo	1.83 m/s
Percentil 25%	1.88 m/s
Percentil 50%	2.37 m/s
Percentil 75%	3.14 m/s
Valor máximo	3.47 m/s

Fuente: Autor

3.6.5. Análisis estadístico para recurso eólico de la vía cuenca – azogues

Para el diseño y simulación de un sistema híbrido eólico/fotovoltaico es fundamental determinar con precisión los parámetros de Weibull (c y k), los cuales describen la distribución de velocidades del viento en el área de estudio. Este análisis se basa en la recopilación y procesamiento de datos de velocidad del viento obtenidos de repositorios online como Weatherspark y Meteoblue. Inicialmente, se accede a estos repositorios para descargar los datos históricos de velocidad del viento, registrando información a intervalos regulares durante un período significativo, idealmente de un año (ver Tabla 7), para obtener datos representativos y fiables.

Tabla 7. Datos anuales de velocidad del viento en la autopista Cuenca - Azogues

Intervalo de velocidades (m/s)	Centro de velocidades (m/s)	Frecuencia (Horas)
0 - 1.34	0.67	2099
1.34 - 3.12	2.23	5103
3.12 - 5.36	4.24	1470
5.36 - 5.81	5.58	84

Fuente: (MeteoBlue, 2024; Weather Spark, 2021)

La Tabla 7 presenta datos históricos sobre la velocidad del viento en la autopista Cuenca - Azogues, organizados en intervalos de velocidades, centros de velocidades y frecuencia en horas. En primer lugar, se observa que el intervalo de 1.34 - 3.12 m/s, con un centro de 2.23 m/s, tiene la mayor frecuencia, con 5103 horas, indicando que estas velocidades son las más comunes en la zona. Por otro lado, el intervalo de 0 - 1.34 m/s, centrado en 0.67 m/s, registra 2099 horas, sugiriendo una presencia significativa de vientos bajos. Además, los intervalos de 3.12 - 5.36 m/s y 5.36 - 5.81 m/s, con centros en 4.24 m/s y 5.58 m/s respectivamente, muestran frecuencias mucho menores, de 1470 y 84 horas, respectivamente. Estos datos son cruciales para evaluar el potencial eólico de la región, ya que permiten identificar las velocidades de viento predominantes y su duración.

Una vez recopilados los datos, se procede a definir la distribución acumulada $F(v)$ de Weibull, que está dada por la ecuación 31.

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (31)$$

Donde v representa la velocidad del viento, c es el factor de escala, y k es el factor de forma. Posteriormente, se aplica la transformación logarítmica a esta ecuación para facilitar el ajuste por mínimos cuadrados. Esta transformación se expresa mediante la ecuación 32.

$$\ln(-\ln(1 - F(v))) = k * \ln(k) - k * \ln(c) \quad (32)$$

Este paso es esencial ya que permite linealizar la ecuación, lo cual simplifica considerablemente el proceso de ajuste de datos. Con los datos transformados, se realiza un ajuste por mínimos cuadrados a la recta $y = kx + B$, donde $y = \ln(-\ln(1 - F(v)))$, $x = \ln(v)$, y $B = -k * \ln(c)$. Las expresiones para calcular los coeficientes de la recta de regresión lineal son las ecuaciones 33 y 34.

$$A = \frac{N \sum(x_i y_i) - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (33)$$

$$B = \frac{\sum y_i - A \sum x_i}{N} \quad (34)$$

Una vez calculados los coeficientes A y B , se determina el valor de k a partir de la pendiente A , y el valor de c se obtiene utilizando la ecuación 35. Por otro lado, en la Tabla 8 se presentan los parámetros de Weibull de forma detallada.

$$c = e^{-\left(\frac{B}{k}\right)} \quad (35)$$

Tabla 8. Cómputo de parámetros de Weibull para velocidad del viento en la autopista Cuenca - Azogues

Velocidades V_i m/s	Frecuencia n_i (h)	Frecuencia Relativa $f_i=n_i/N$	Frecuencia Relativa Acumulada F_i	y_i $\ln(-\ln(1-F_i))$	x_i $\ln(v_i)$	f_i*x_i	$f_i*x_i^2$	f_i*y_i	$f_i*x_i*y_i$
0.670	62.550	0.00714	0.007	-4.938	-0.400	-	0.001	-	0.014
						0.0029		0.0353	
0.720	69.774	0.00797	0.015	-4.185	-0.329	-	0.001	-	0.011
						0.0026		0.0333	
0.769	76.654	0.00875	0.024	-3.724	-0.262	-	0.001	-	0.009
						0.0023		0.0326	
0.819	83.197	0.00950	0.033	-3.384	-0.200	-	0.000	-	0.006
						0.0019		0.0321	
2.009	153.724	0.01755	0.397	-0.683	0.698	0.0122	0.009	-	-0.008
								0.0120	
2.059	153.673	0.01754	0.414	-0.626	0.722	0.0127	0.009	-	-0.008
								0.0110	
2.108	153.431	0.01752	0.432	-0.571	0.746	0.0131	0.010	-	-0.007
								0.0100	
2.158	153.006	0.01747	0.449	-0.517	0.769	0.0134	0.010	-	-0.007
								0.0090	
3.001	123.058	0.01405	0.721	0.245	1.099	0.0154	0.017	0.0034	0.004
3.051	120.283	0.01373	0.735	0.284	1.115	0.0153	0.017	0.0039	0.004
3.100	117.432	0.01341	0.748	0.322	1.131	0.0152	0.017	0.0043	0.005
3.150	114.510	0.01307	0.762	0.360	1.147	0.0150	0.017	0.0047	0.005
4.043	56.244	0.00642	0.934	1.002	1.397	0.0090	0.013	0.0064	0.009
4.092	53.052	0.00606	0.940	1.037	1.409	0.0085	0.012	0.0063	0.009
4.142	49.901	0.00570	0.946	1.072	1.421	0.0081	0.012	0.0061	0.009
4.191	46.799	0.00534	0.952	1.107	1.433	0.0077	0.011	0.0059	0.008
5.481	1.614	0.00018	0.999	2.026	1.701	0.0003	0.001	0.0004	0.001
5.530	1.955	0.00022	1.000	2.099	1.710	0.0004	0.001	0.0005	0.001

5.580	2.503	0.00029	1.000				
Total	8760.000	1.00000			0.784	0.826	- 0.138
							0.5334
A	0.646	B	-0.631	c	2.655	k	0.646

Fuente: Autor

Una vez obtenidos los parámetros de Weibull, se procede al cálculo de la densidad de probabilidad de Weibull. Para lo cual, se aplica la ecuación 36 correspondiente a la aplicación de la fórmula de Weibull que se encarga de describir la función de densidad de probabilidad de las velocidades del viento. Esta ecuación permite modelar la distribución de probabilidad de que el viento sople a una velocidad específica v . En esta fórmula, k es el factor de forma que describe la variabilidad de las velocidades del viento, y c es el factor de escala que indica la velocidad media del viento. Al aplicar esta ecuación, se obtiene una curva que muestra la probabilidad de diferentes velocidades del viento, lo cual es crucial para dimensionar adecuadamente los componentes del sistema eólico y fotovoltaico (ver Figura 28).

$$p(v) = \frac{0.646}{2.655} \left(\frac{v}{2.655} \right)^{0.646-1} * e^{-\left(\frac{v}{2.655} \right)^{0.646}} \quad (36)$$

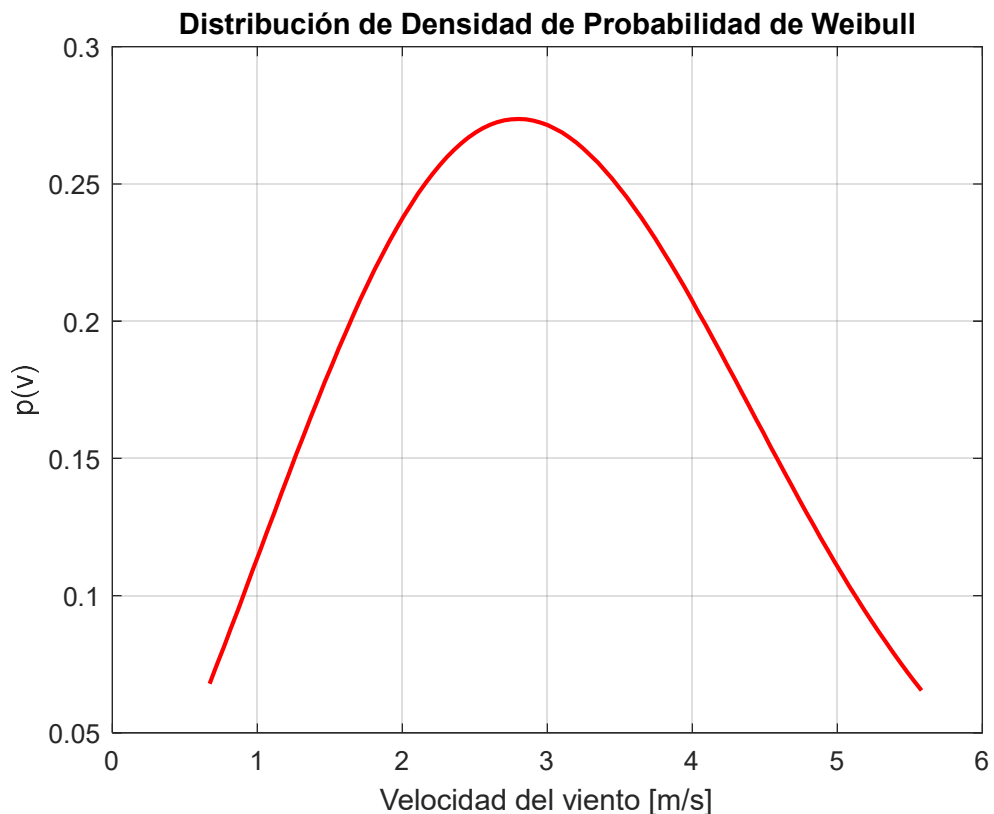


Figura 28. Distribución de densidad de Weibull en carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.

Fuente: Autor

La probabilidad de Weibull $p(v)$, inicialmente aumenta con la velocidad del viento, alcanzando un máximo y luego disminuyendo. Este comportamiento es típico de la distribución de Weibull y refleja que hay una velocidad del viento más probable alrededor de la cual ocurren la mayoría de los eventos. Por ejemplo, las velocidades más bajas (cerca de 0.67 m/s) tienen una probabilidad de 0.06795, mientras que las velocidades intermedias (alrededor de 2.7034 m/s) tienen probabilidades más altas, alcanzando un máximo de 0.27317. Este pico indica la velocidad más frecuente esperada en la zona de estudio.

3.6.6. Análisis del recurso solar

Para realizar el análisis del recurso solar, se situó un punto en la coordenada 2.92°S 79.01°W, correspondiente a un tramo de la carretera Cuenca – Azogues (ver Figura 29), utilizando la plataforma del atlas solar. Inicialmente, se seleccionó esta ubicación específica debido a su relevancia para el estudio de diseño y simulación del sistema híbrido eólico/fotovoltaico para alumbrado público en esta vía. Posteriormente, se optó por realizar un análisis diario, lo cual permitió una evaluación detallada de la irradiancia solar a lo largo del tiempo.

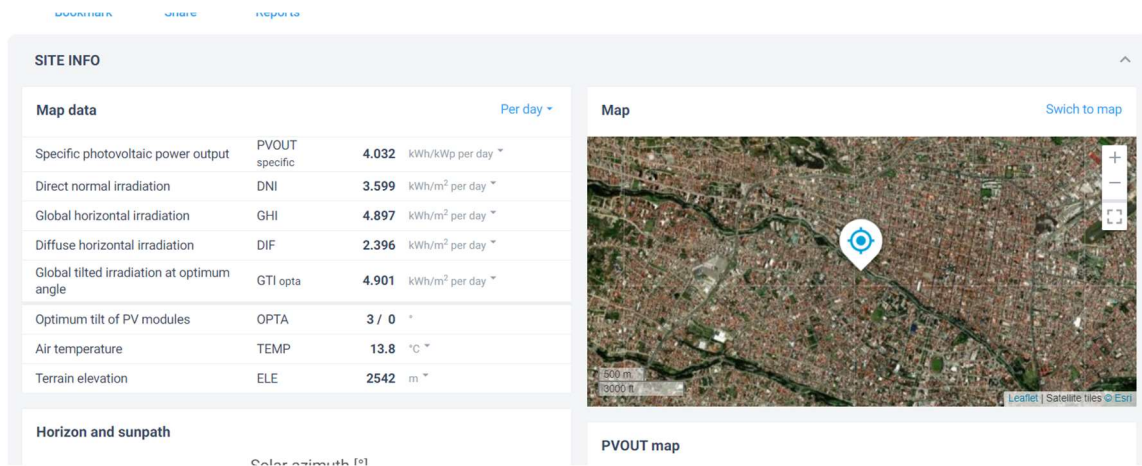


Figura 29. Ubicación de punto para evaluar el recurso solar en la carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.

Fuente: (Atlas solar, 2024)

Para facilitar la identificación de patrones y tendencias en la disponibilidad de energía solar, los datos de irradiancia solar fueron ordenados por día el mes (ver Tabla 9). Esta agrupación fue importante para calcular el promedio de la radiación normal directa, una medida esencial para el dimensionamiento de sistemas solares. Este promedio proporcionó una base sólida para determinar las horas solares pico y optimizar el diseño del sistema energético.

El análisis del recurso solar, basado en la tabla proporcionada, revela variaciones significativas en la irradiancia solar a lo largo del año. En primer lugar, se observa que las

horas solares pico (PSH) más bajas se encuentran en los meses de invierno, específicamente en enero y febrero, con valores promedio diarios de 4.177 y 3.453 horas, respectivamente. Esto se debe a la menor intensidad y duración de la luz solar durante estos meses. En cambio, los meses de verano, como junio y julio, presentan un aumento en las PSH, alcanzando valores de 3.528 y 3.451 horas al día, lo que indica una mayor disponibilidad de energía solar durante esta época.

Tabla 9. Recurso solar en la autopista Cuenca - Azogues

Radiación normal directa [Wh/m²]												
Horas	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 - 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 - 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 - 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 - 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 - 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 7	75	47	52	74	96	83	76	78	114	166	185	114
7 - 8	272	209	209	229	264	275	288	279	295	305	346	291
8 - 9	361	295	281	293	310	315	327	338	369	382	453	392
9 - 10	427	350	340	337	336	337	335	356	390	434	528	449
10 - 11	469	395	387	359	366	339	328	348	375	447	560	485
11 - 12	450	404	367	337	351	316	303	312	312	424	547	478
12 - 13	439	384	330	310	335	300	297	288	285	430	512	460
13 - 14	436	370	284	272	310	307	286	272	276	344	435	417
14 - 15	371	266	250	246	303	320	294	273	266	287	352	355
15 - 16	324	249	236	270	312	341	320	295	271	260	302	315
16 - 17	281	235	225	272	313	342	326	290	261	233	256	277
17 - 18	237	212	206	226	204	253	271	241	167	138	146	204
18 - 19	35	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19 - 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20 - 21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21 - 22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22 - 23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23 - 24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	4177	3453	3167	3225	3500	3528	3451	3370	3381	3850	4622	4237
Horas solares pico al día (PSH)	4.177	3.453	3.167	3.225	3.500	3.528	3.451	3.370	3.381	3.850	4.622	4.237

Fuente: Autor

En segundo lugar, la distribución horaria de la irradiancia solar muestra que las horas comprendidas entre las 6 AM y las 6 PM son las más productivas en términos de captación de energía solar. Los valores más altos de irradiancia se registran típicamente entre las 9 AM y las 3 PM, con picos significativos alrededor del mediodía. Esta información es crucial para el diseño y la orientación de los paneles solares, ya que permite maximizar la captación de energía durante las horas de mayor irradiancia. Además, la variabilidad horaria subraya la importancia de ajustar los sistemas de seguimiento solar para optimizar el rendimiento.

En tercer lugar, el análisis de las PSH mensuales destaca una tendencia ascendente en los meses de otoño, especialmente en octubre y noviembre, donde las PSH alcanzan 3.85 y 4.622 horas diarias, respectivamente. Este patrón sugiere que el periodo post-verano aún ofrece un recurso solar significativo, ideal para aplicaciones que requieran un suministro constante de energía solar. Por otro lado, diciembre, aunque presenta un ligero descenso comparado con noviembre, mantiene un recurso solar considerable con 4.237 PSH.

Además, la información proporcionada es esencial para la planificación y diseño de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos, como el caso de estudio para la vía Cuenca – Azogues. La integración de estos datos en la simulación y diseño de tales sistemas permite una evaluación precisa del potencial energético renovable, facilitando decisiones informadas sobre la capacidad y configuración óptimas del sistema. La comprensión detallada de las PSH y su variabilidad mensual asegura que el sistema diseñado sea eficiente y confiable durante todo el año.

3.7 Selección de generador eólico

Para seleccionar el generador eólico más adecuado para la iluminación de la vía Cuenca-Azogues, se realizó un análisis exhaustivo de diversas tecnologías disponibles (ver Tabla 10). Primero, se evaluaron las características de las turbinas eólicas, considerando la velocidad de arranque y la potencia generada. Además, se tomaron en cuenta las ventajas y desventajas de cada tipo de turbina, así como su adaptabilidad al entorno urbano y a las condiciones de viento específicas de la región. Posteriormente, se compararon las turbinas Savonius, Darrieus, híbrida Darrieus-Savonius, Tumo-Int Gearless, Optiwind, D400 Direct Drive y Vortex Bladeless.

Tabla 10. Selección de generador eólico para iluminación en la autopista Cuenca - Azogues

Turbina Eólica	Tipo	Velocidad de Arranque (m/s)	Potencia Generada	Características	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Savonius	Eje Vertical	1-2	300W 1000W	Diseño simple y robusto, autoarranque, funcionamiento a bajas velocidades sencillas	Buen rendimiento a bajas velocidades, mantenimiento sencillo	Menor eficiencia comparada con otras turbinas	Áreas urbanas, con viento variable
Darrieus	Eje Vertical	2-3	1000W 5000W	Palas curvas, alta eficiencia, requiere sistema de arranque	Alta eficiencia, adecuado para velocidades moderadas	Difícil para autoarranque, mayor costo de mantenimiento	Áreas rurales y urbanas con vientos moderados
Híbrida Darrieus-Savonius	Eje Vertical	1-2	40W 2000W	Combina diseños de Darrieus y Savonius, autoarranque mejorado	Buen rendimiento en todas las condiciones, autoarranque, mayor eficiencia	Diseño más complejo y costoso	Zonas urbanas y suburbanas, entornos turbulentos
Tumo-Int Gearless	Direct Drive	0.5-1	1000- 1500W	Sin engranajes, bajo mantenimiento, ligera	Funcionamiento eficiente en bajos vientos, fácil instalación	Menor potencia máxima	Residencias, pequeñas aplicaciones industriales
Optiwind	Horizontal	2-3	10kW 30kW	Tecnología de aceleración de viento, palas	Mayor generación de energía, cinco funcionamiento silencioso	Requiere espacio para instalación	Áreas pobladas con vientos bajos, entornos estructuralmente densos
D400 Direct Drive	Direct Drive	2	400W	Palas optimizadas para baja velocidad, generador de 400W	Muy silenciosa, sin vibraciones	Potencia limitada	Instalaciones marinas, tejados en áreas urbanas
Vortex Bladeless	Oscilante Vertical	0.5-1	3W 100W	Tecnología sin aspas basada en oscilaciones,	Bajo mantenimiento, menos impacto	Potencia limitada comparada con	Áreas urbanas, sistemas autónomos y

Turbina Eólica	Tipo	Velocidad de Arranque (m/s)	Potencia Generada	Características	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
				ideal para vientos	bajos ambientales visual, para áreas urbanas	y turbinas tradicionales, aún desarrollo	complementarios con paneles solares

Fuente: (Elprocus, 2020)(Mathew & Philip, 2012)(WindCycle, 2024)(Green Home Gnome, 2019)(David & Villarreal, 2018)

El generador eólico seleccionado para la iluminación de la vía Cuenca-Azogues es la turbina híbrida Darrieus-Savonius, debido a su capacidad para operar eficientemente a bajas velocidades de viento y su robustez frente a condiciones climáticas variables. Además, esta turbina combina las ventajas de los diseños Darrieus y Savonius, permitiendo un autoarranque mejorado y una mayor eficiencia general. Por otra parte, su diseño compacto y duradero la hace ideal para su instalación a lo largo de la carretera, optimizando así el espacio disponible. Asimismo, esta selección garantiza un suministro de energía renovable continuo y confiable. A continuación, en la Tabla 11 se presentan las características técnicas del generador elegido.

Tabla 11. Características de turbina eólica seleccionada.

Características Técnicas	Descripción
Tipo de Turbina	Híbrida Darrieus-Savonius
Velocidad de Arranque	1-2 m/s
Potencia Generada	40W a 2000W
Materiales	Aleación de aluminio y fibra de vidrio
Altura de la Turbina	3-5 metros
Diámetro del Rotor	1-3 metros
Vida Útil	20 años
Mantenimiento	Bajo, anual
Aplicaciones	Iluminación de carreteras, áreas urbanas y suburbanas

Fuente: (Makemu, 2024)

3.7.1. Cálculo de potencia y energía generada

El cálculo de la potencia y la energía generada por una turbina eólica es fundamental para evaluar su viabilidad y eficiencia en aplicaciones específicas, como la iluminación vial.

En primer lugar, es esencial considerar varios factores clave, entre los cuales se encuentran la velocidad del viento, el área barrida por las aspas de la turbina y el coeficiente de potencia. Estos parámetros permiten estimar con precisión la cantidad de energía que la turbina puede generar en condiciones promedio. Además, comprender estos cálculos ayuda a planificar la instalación y el mantenimiento de las turbinas, optimizando su rendimiento a largo plazo.

3.7.2. Cálculo del Área Barrida

Para calcular el área barrida por las aspas de la turbina eólica híbrida Darrieus-Savonius, se considera un diámetro promedio de 2 metros y una altura de 3 metros. Estos valores representan dimensiones típicas para este tipo de turbinas, permitiendo una estimación adecuada del área efectiva que interactúa con el viento. Primero, se multiplica el diámetro por la altura para obtener el área total en metros cuadrados. Así, el área barrida resulta ser de 6 metros cuadrados (ver Ecuación 37).

$$A = D * H = 2 * 3 = 6 \text{ m}^2 \quad (37)$$

3.7.3. Velocidad del Viento

La velocidad del viento es un factor determinante en la cantidad de energía que una turbina eólica puede generar. En el caso de la vía Cuenca-Azogues, la velocidad promedio del viento se ha medido en 3.18 m/s. Este valor es esencial para el cálculo de la potencia generada, ya que la energía del viento es proporcional al cubo de su velocidad. Es decir, pequeñas variaciones en la velocidad del viento pueden resultar en grandes cambios en la potencia generada.

3.7.4. Coeficiente de Potencia

El coeficiente de potencia (C_p) es una medida de la eficiencia con la que una turbina eólica convierte la energía del viento en energía mecánica. Para la turbina híbrida Darrieus-Savonius, se tiene un C_p promedio de 0.35, lo cual es típico para esta clase de turbinas. Este coeficiente indica que la turbina puede convertir el 35% de la energía cinética del viento en energía útil. Aunque pueda parecer un porcentaje bajo, es importante recordar que ninguna turbina puede capturar el 100% de la energía del viento debido a las limitaciones físicas establecidas por la Ley de Betz. Además, un C_p de 0.35 es bastante eficiente para turbinas de eje vertical, que suelen tener diseños más compactos y robustos.

3.7.5. Cálculo de la Potencia

Para calcular la potencia generada por la turbina híbrida Darrieus-Savonius, se utiliza la fórmula de potencia eólica (ver Ecuación 36). En esta fórmula, ρ representa la densidad del

aire, A es el área barrida por las aspas, v es la velocidad del viento y C_p es el coeficiente de potencia. Al insertar los valores específicos: una densidad del aire de 1.225 kg/m^3 , un área de 6 m^2 , una velocidad del viento de 3.18 m/s y un coeficiente de potencia de 0.35 , se puede calcular la potencia. El resultado es una potencia aproximada de 46.97 W . Este valor muestra la capacidad de la turbina para generar energía bajo las condiciones promedio de viento de la ubicación específica.

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * C_p \quad (38)$$

$$P = \frac{1}{2} * 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 6\text{m}^2 * 3.18 \frac{\text{m}}{\text{s}}^3 * 0.35 = 46.97 \text{ W} \quad (39)$$

3.7.6. Energía Anual Generada

Para determinar la energía anual generada por la turbina eólica, se multiplica la potencia promedio diaria por el número total de horas en un año (ver Ecuación 40). Con una potencia calculada de 46.97 W y sabiendo que un año tiene 8760 horas, se obtiene que la energía anual es de aproximadamente $411,577.2 \text{ Wh}$, o 412 kWh .

$$E_{\text{anual}} = P * \text{horas del año} \quad (40)$$

$$E_{\text{anual}} = 46.97 * 8760 = 412 \text{ kWh/año} \quad (41)$$

3.8 Selección de panel fotovoltaico

La selección del panel fotovoltaico se realizó mediante un análisis exhaustivo de diversas opciones disponibles en el mercado, priorizando aquellos con alta eficiencia y peso ligero. Primero, se identificaron los paneles que ofrecían la mejor relación entre capacidad máxima y peso, crucial para su instalación en vías rápidas. Asimismo, se evaluaron las características técnicas, como la resistencia a condiciones climáticas adversas y la facilidad de integración en infraestructuras existentes. Posteriormente, se compararon las ventajas y desventajas de cada opción, considerando su durabilidad y mantenimiento. Finalmente, se eligió el sistema First Light BFL Series por su diseño cilíndrico innovador. Esta reduce la acumulación de suciedad y mejora la resistencia al viento.

Tabla 12. Selección de panel fotovoltaico para iluminación en la autopista Cuenca - Azogues

Panel Fotovoltaico	Capacidad Máxima (W)	Peso (kg)	Características	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Philips SunStay Pro	325W	15 kg	Panel solar y LED en un solo módulo, opciones de control avanzado	Fácil instalación, mantenimiento reducido, ahorro de energía	Limitado a aplicaciones pequeñas y medianas, mayor costo por unidad	Iluminación de calles y caminos en zonas urbanas y suburbanas
FlexSol Soluxio	100W a 150W	15 kg	Tecnología avanzada, diseño modular, integración de sistemas inteligentes	Alta durabilidad, funcionamiento autónomo, resistencia al viento	Costo inicial elevado, requiere instalación profesional	Iluminación de calles, caminos, WiFi y aplicaciones de ciudad inteligente
First Light BFL Series	100W a 240W	5 kg	Panel solar cilíndrico, integración fácil en postes existentes, resistente a vientos fuertes	Alta eficiencia, instalación fácil, menor acumulación de suciedad y nieve	Menor capacidad de generación individual, requiere múltiples módulos	Iluminación de carreteras y autopistas, retrofits de postes existentes
Fly Solartech Cylindrical Panel	100W a 240W	5 kg	Panel solar cilíndrico, integración fácil en postes existentes, resistente a vientos fuertes	Alta eficiencia, instalación fácil, menor acumulación de suciedad y nieve	Menor capacidad de generación individual requiere múltiples módulos	Iluminación de carreteras y autopistas, retrofits de postes existentes

Panel Fotovoltaico	Capacidad Máxima (W)	Peso (kg)	Características	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Greenshine New Energy	60W a 80W	20 kg	Paneles solares monocristalinos, diseño modular	Alta eficiencia, durabilidad, resistente a condiciones climáticas extremas	Costo inicial elevado, instalación compleja	Iluminación de calles, caminos y áreas de alta seguridad

Fuente: (Philips, 2024)(FlexSol, 2024)(First Light, 2024)(PV Magazine, 2024)(Greenshine, 2024)

La elección seleccionada para la iluminación de vías rápidas es el sistema First Light BFL Series, debido a sus características de alta eficiencia, peso ligero y facilidad de instalación. Este sistema ofrece una solución cilíndrica innovadora que se integra fácilmente en postes existentes, reduciendo la acumulación de suciedad y nieve y aumentando la resistencia al viento. Además, su capacidad de operar sin conexión a la red y su diseño modular lo hacen ideal para aplicaciones en vías rápidas. Por lo tanto, el sistema asegura una iluminación continua y fiable incluso en condiciones adversas. Además, su diseño eficiente y opciones de configuración permiten adaptarse a diversas necesidades y entornos, proporcionando una solución versátil y eficiente para la iluminación de carreteras y caminos. A continuación, en la Tabla 13 se presentan las características técnicas del panel seleccionado.

Tabla 13. Características Técnicas del Panel First Light BFL Series

Característica	Descripción
Capacidad Máxima (W)	100W a 240W
Peso (kg)	5 kg
Diseño	Cilíndrico, integración fácil en postes existentes
Ventajas	Alta eficiencia, instalación fácil, resistencia al viento, menor acumulación de suciedad y nieve
Desventajas	Menor capacidad de generación individual requiere múltiples módulos
Aplicaciones	Iluminación de carreteras y autopistas, retrofits de postes existentes
Referencia	First Light BFL Series

Fuente:(First Light, 2024)

3.8.1. Cálculo de la potencia y energía generada

Para determinar la potencia que puede generar un panel fotovoltaico, es crucial considerar varios factores, entre ellos la eficiencia del panel, la irradiancia solar promedio y el área del panel. En el caso del panel First Light BFL Series, se ha utilizado un valor típico de eficiencia del 20%, lo cual es característico de los paneles de alta eficiencia. Además, se ha tomado en cuenta el valor promedio de las horas solares pico, que en este caso es de 3.6 kWh/m² por día. Este cálculo proporciona una estimación precisa de la energía que el panel puede generar diaria y anualmente.

3.8.2. Cálculo de la Energía Diaria Generada

El cálculo de la energía diaria generada por el panel fotovoltaico se basa en la fórmula que considera el área del panel (ver Ecuación 42), la irradiancia solar promedio y la eficiencia del panel. En este caso, se ha asumido un área de 1.6 m² para el panel First Light BFL Series. Al multiplicar esta área por las horas solares pico y la eficiencia del panel, se obtiene la energía diaria que el panel puede generar. Así, con una eficiencia del 20%, se estima que el panel puede generar aproximadamente 1.152 kWh por día.

$$E_{generada} = A * PSH * Eficiencia \quad (42)$$

$$E_{generada} = 1.6 * 3.6 * 0.2 = 1.152 kWh \quad (43)$$

3.8.3. Cálculo de la energía anual generada

Para calcular la energía anual generada por el panel fotovoltaico, se multiplica la energía diaria generada por el número de días en un año. Este cálculo es fundamental para entender el rendimiento a largo plazo del panel y su contribución total a las necesidades energéticas del sistema. En el caso del panel First Light BFL Series, se estima que puede generar aproximadamente 420.48 kWh al año. Este valor proporciona una visión clara de la capacidad del panel para contribuir de manera sostenible a la iluminación de vías rápidas, asegurando que el sistema de iluminación pueda funcionar eficientemente durante todo el año.

$$E_{anual} = E_{diaria} * 365 \quad (44)$$

$$E_{anual} = 1.152 kWh * 365 = 420.48 kWh \quad (45)$$

El análisis técnico, relacionado al balance energético, revela que cada poste equipado con una luminaria LED de 150 W, una turbina eólica y un panel solar genera un excedente de energía (ver Tabla 14). Diariamente, el sistema produce 2.28 kWh, superando el consumo necesario de 1.8 kWh por luminaria, lo que resulta en un excedente de 0.48 kWh por poste. Este exceso de energía garantiza la autosuficiencia del sistema de alumbrado público y permite compensar variaciones en la generación debidas a cambios climáticos. Mensualmente, el sistema genera 68.4 kWh frente a un consumo de 54 kWh, y anualmente produce 832.48 kWh, con un consumo de 657 kWh, proporcionando un excedente anual de 175.48 kWh.

Tabla 14. Balance energético

Periodo	Energía Fotovoltaica (kWh)	Energía Eólica (kWh)	Energía Producida Total (kWh)	Energía Consumida en sitio de análisis (kWh)	Excedente energético (kWh)
Diario	1.15	1.13	2.28	1.8	+0.48
Mensual	34.5	33.9	68.4	54	+14.4
Anual	420.48	412	832.48	657	+175.48

Fuente: Autor

3.9 Dimensionamiento del sistema de almacenamiento

El objetivo del dimensionamiento del sistema de almacenamiento es asegurar que cada poste de alumbrado público, en el tramo Cuenca-Azogues, funcione de manera continua durante tres días sin energía generada localmente. Para lograr esto, se utilizan baterías de iones de litio. Este diseño es fundamental para garantizar que las luminarias sigan operativas en condiciones climáticas adversas, que puedan reducir la generación de energía renovable.

La capacidad de almacenamiento se determina considerando el consumo diario por poste, que es de 1.8 kWh, multiplicado por los tres días de autonomía deseados, lo que da un total de 5.4 kWh. A esto se suma el excedente diario de energía, que es de 0.48 kWh, alcanzando así una capacidad total de 5.88 kWh. Sin embargo, al tener en cuenta una eficiencia de carga y descarga del 85%, la capacidad ajustada resulta ser de 6.92 kWh.

$$E_{\text{autonomía}} = N * E_{\text{consumida}} = 3 * 1.8kWh = 5.4kWh \quad (46)$$

$$\text{Capacidad total} = E_{\text{autonomía}} + E_{\text{excedente}} = 5.4kWh + 0.48kWh = 5.88kWh \quad (47)$$

$$\text{Capacidad ajustada} = \frac{\text{Capacidad total}}{\text{Eficiencia}} = \frac{5.88 kWh}{0.85} = 6.92 kWh \quad (48)$$

Por otro lado, se seleccionan baterías de iones de litio con un voltaje de 48V y una capacidad de 100Ah, lo que equivale a una capacidad individual de 4.8 kWh por batería. El número de baterías requeridas se determina dividiendo la capacidad ajustada entre la capacidad de una batería individual, resultando en aproximadamente 1.44 baterías. Redondeando este número al siguiente entero, se concluye que se necesitan dos baterías por poste para asegurar que cada sistema pueda operar de manera autónoma durante tres días.

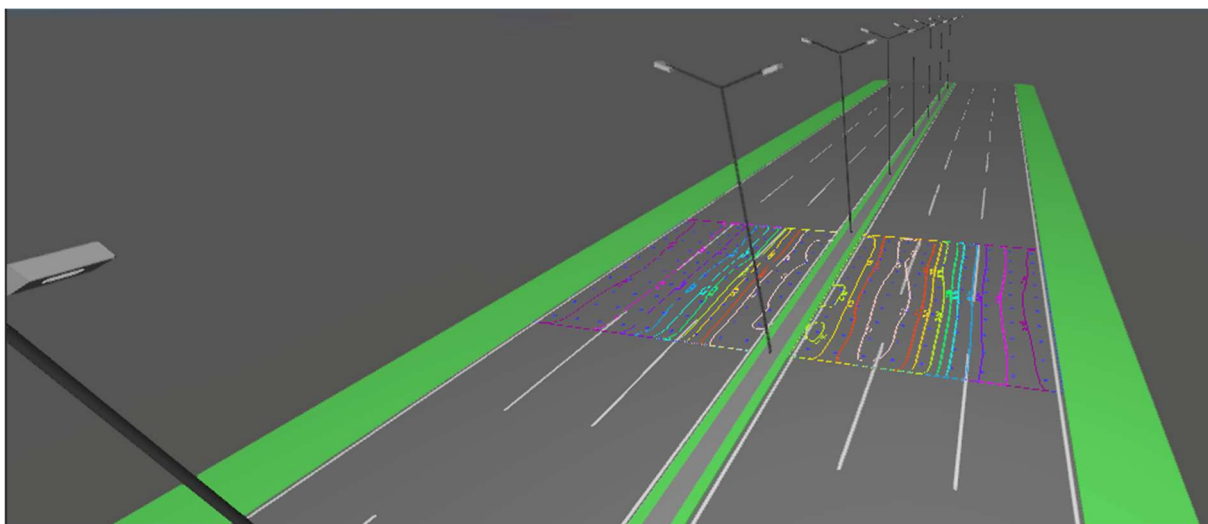
$$\text{Capacidad de una batería} = 48 \text{ V} * 100 \text{ Ah} = 4.8 \text{ kWh} \quad (49)$$

$$\text{Número de baterías} = \frac{\text{Capacidad ajustada}}{\text{Capacidad de una batería}} = \frac{6.92 \text{ kWh}}{4.8 \text{ kWh}} = 1.44 \quad (50)$$

4 CAPÍTULO 4

4.1 Análisis de la vía cuenca-azogues con DIALux

Una vez replicada un tramo de la vía cuenca-azogues, se presenta los resultados de la simulación en Dialux para dos carreteras clasificadas como M4 (ver Figura 30). Se observa que ambos tramos cumplen con los valores objetivo de luminancia media (L_{av}) de 0.76 cd/m^2 , superando el mínimo requerido de 0.75 cd/m^2 . La uniformidad global (U_o) y la uniformidad longitudinal (U_l) también están dentro de los estándares, con valores de 0.52 y 0.95 respectivamente, ambos superiores a los mínimos establecidos. El índice de deslumbramiento (TI) es bajo, con un valor de 3%, significativamente menor que el límite máximo de 15%, lo que asegura una buena visibilidad sin causar molestias.



m	0.750	2.250	3.750	5.250	6.750	8.250	9.750	11.250	12.750	14.250
33.222	10.66	10.61	10.54	10.38	10.20	10.20	10.38	10.54	10.61	10.66
31.667	11.31	11.36	11.29	11.08	10.92	10.92	11.08	11.29	11.36	11.31
30.111	11.90	12.00	11.90	11.74	11.67	11.67	11.74	11.90	12.00	11.90
28.556	12.71	12.84	12.69	12.61	12.59	12.59	12.61	12.69	12.84	12.71
27.000	13.80	13.86	13.74	13.70	13.75	13.75	13.70	13.74	13.86	13.80
25.444	14.89	14.97	14.79	14.77	14.81	14.81	14.77	14.79	14.97	14.89
23.889	15.78	15.73	15.54	15.48	15.47	15.47	15.48	15.54	15.73	15.78
22.333	16.22	16.01	15.74	15.58	15.58	15.58	15.58	15.74	16.01	16.22
20.778	15.64	15.17	15.09	14.75	14.39	14.39	14.75	15.09	15.17	15.64

Maintenance value, horizontal illuminance [lx] (Value chart)

Figura 30. Simulación en DIALux, carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.

Por otro lado, el índice de energía reflejada (REI) de 0.82 también supera el mínimo de 0.30, indicando una adecuada distribución de la luz reflejada. Adicionalmente, los indicadores de eficiencia energética muestran un consumo de energía de 212.0 kWh/año y un valor de densidad de potencia (Dp) de 0.009 W/lx*m², destacando la eficiencia del sistema de iluminación implementado. En resumen, los resultados de la simulación confirman que el diseño de iluminación cumple con los estándares y objetivos establecidos, garantizando eficiencia y confort visual.

4.2 Potencial de Captación de Energía Solar

Para visualizar la radiación solar en el diseño y simulación del sistema híbrido eólico/fotovoltaico destinado al alumbrado público en vías rápidas, se utilizan datos del portal de la NASA, atlas solar mundial y de las bases de datos Meteo blue. De esta manera, estos recursos determinan la radiación solar mensual en el área seleccionada de la vía Cuenca-Azogues (ver Figura 31), lo que permite estimar la generación de energía del módulo solar del colector de energía propuesto para cada mes (ver Figura 32). En consecuencia, los datos muestran un aumento en la radiación solar desde enero hasta julio, seguido de una disminución de julio a diciembre.

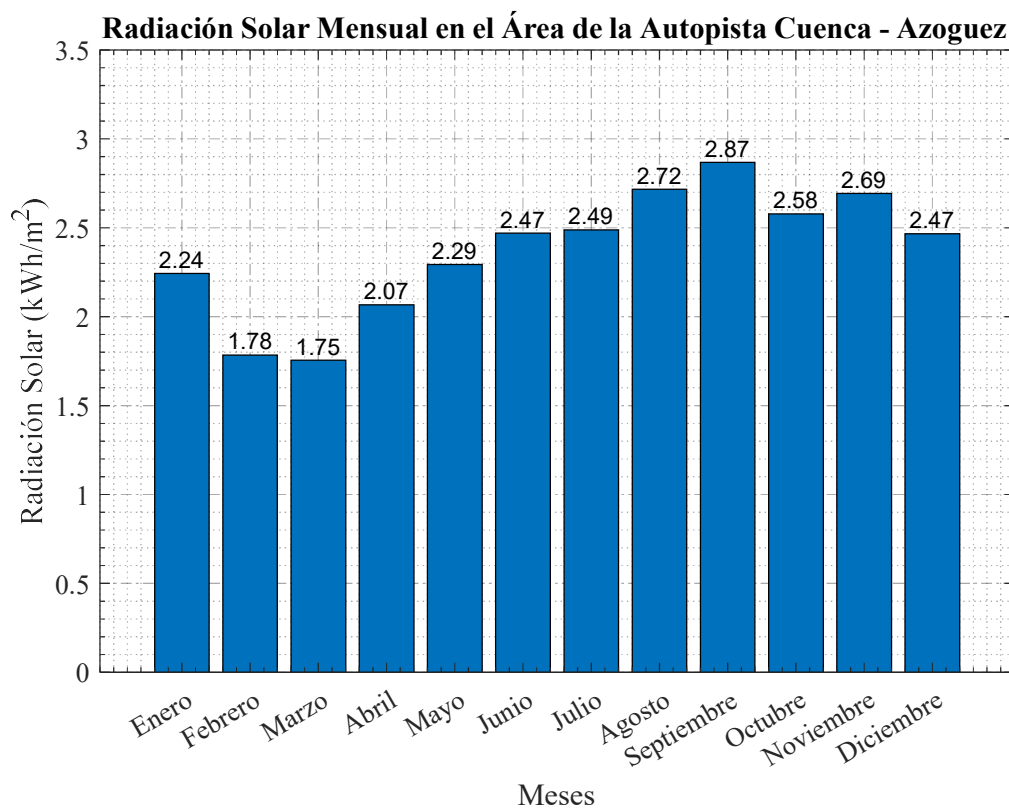


Figura 31. Radiación mensual en el punto de estudio, carretera de alta velocidad Cuenca – Azogues.

Fuente: (NASA, 2023)

La Figura 31 muestra la radiación solar mensual en el área de la autopista Cuenca-Azogues. Los datos, expresados en kWh/m², evidencian una variación a lo largo del año, con un incremento gradual desde enero hasta septiembre, seguido de una disminución hacia diciembre. En enero, la radiación solar es de 2.24 kWh/m²; posteriormente, aumenta a 2.87 kWh/m² en septiembre, el valor más alto del año. Por otro lado, febrero y marzo tienen los valores más bajos, con 1.78 y 1.75 kWh/m², respectivamente.

El incremento constante desde abril, con 2.07 kWh/m², hasta alcanzar un pico en septiembre, indica una tendencia estacional típica, donde los meses de verano reciben mayor radiación solar. En octubre, la radiación disminuye ligeramente a 2.58 kWh/m², continuando esta tendencia en noviembre y diciembre, con 2.69 y 2.47 kWh/m², respectivamente. Este patrón sugiere que los sistemas híbridos eólico/fotovoltaicos en esta región deben diseñarse para maximizar el aprovechamiento durante los meses de alta radiación y gestionar eficientemente los meses de menor radiación.

Por otro lado, la Figura 32 muestra la potencia generada mensualmente en el área de la autopista Cuenca-Azogues, medida en kWh. Se observa que la generación varía a lo largo del año, con un incremento gradual desde marzo hasta alcanzar un pico en septiembre. En enero, la potencia generada es de 5.11 kWh; sin embargo, disminuye a 4.07 kWh en febrero y alcanza su valor más bajo en marzo con 4.00 kWh. A partir de abril, con 4.71 kWh, comienza una tendencia ascendente.

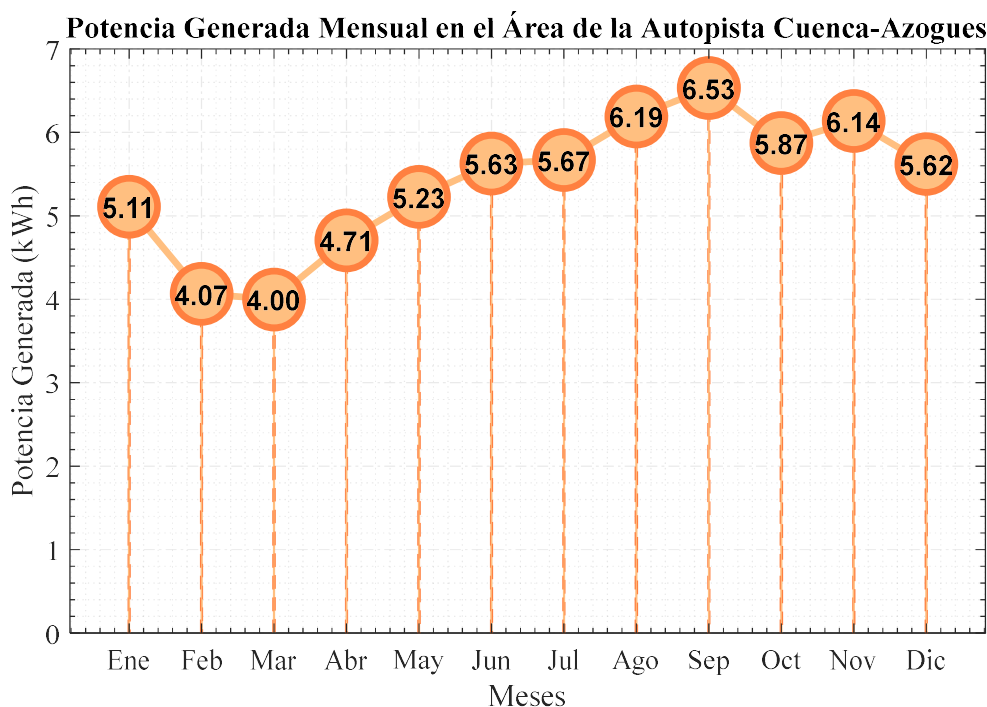


Figura 32. Generación de energía del módulo solar del recolector de energía propuesto en cada mes.

Fuente: Autor

Este incremento continúa hasta septiembre, cuando se alcanza el máximo de 6.53 kWh, lo que refleja un patrón estacional mencionado con anterioridad. En octubre, la potencia generada disminuye ligeramente a 5.87 kWh, y esta tendencia continúa en noviembre y diciembre, con valores de 6.14 kWh y 5.62 kWh, respectivamente. Además, la generación anual de energía solar estimada para la vía rápida Cuenca-Azogues es de 64.7562 kWh.

4.3 Potencial de aprovechamiento de Energía eólica

Para estimar la velocidad del viento en la mediana de la carretera, se realizaron simulaciones de flujo con la herramienta CFD de MATLAB. En este estudio, se fijaron velocidades del vehículo a 80 km/h, 100 km/h y 120 km/h, y se analizó la distribución de la velocidad del viento alrededor del vehículo y del generador de energía.

4.3.1 Análisis con vehículo a 80km/h

Las Figuras 33 y 34 demuestran el comportamiento del viento en la mediana de la autopista cuando un vehículo pasa a 80 km/h, considerando dos configuraciones distintas del cosechador de energía híbrido solar-eólico. En la primera imagen (Figura 33), con los paneles cerrados, se registra una velocidad máxima del viento de 12.94 m/s cerca del cosechador, marcado por un triángulo rojo. Los colores predominantes, como azules y verdes, indican una menor intensidad del flujo de aire. Con los paneles cerrados, la generación de energía eólica es baja, lo que resulta en una distribución del viento menos intensa.

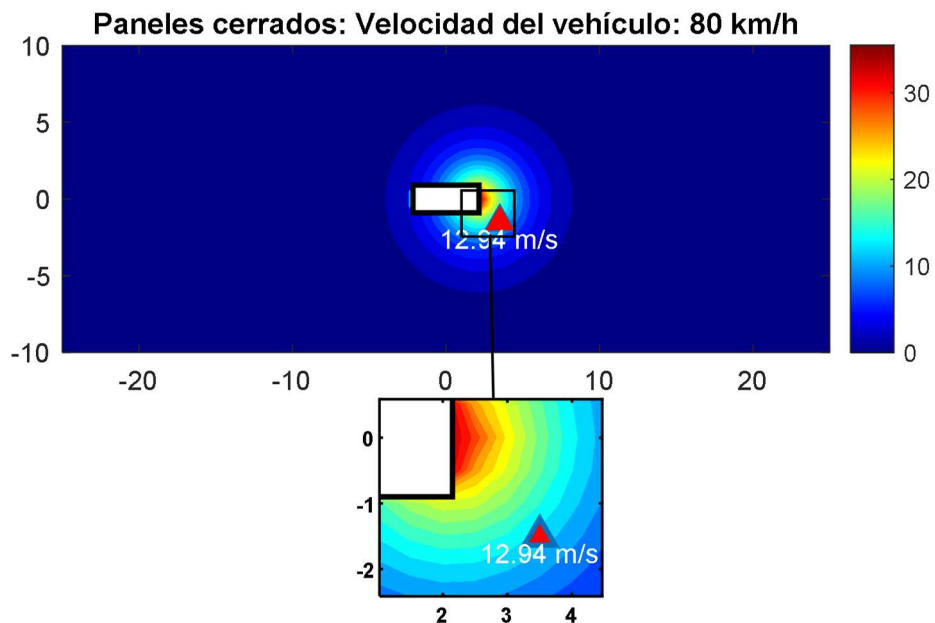


Figura 33. Comportamiento del viento ante el paso de un vehículo que circula a 80 km/h – Paneles cerrados

Fuente: Autor

En cambio, la Figura 34 muestra la situación con los paneles abiertos. Aquí, la velocidad máxima del viento aumenta considerablemente a 25.87 m/s cerca del cosechador. Los colores en esta imagen, con tonos más cálidos como rojos y amarillos, indican una mayor intensidad del flujo de aire. La apertura de los paneles permite una generación activa de energía eólica, incrementando la velocidad del aire que llega al cosechador.

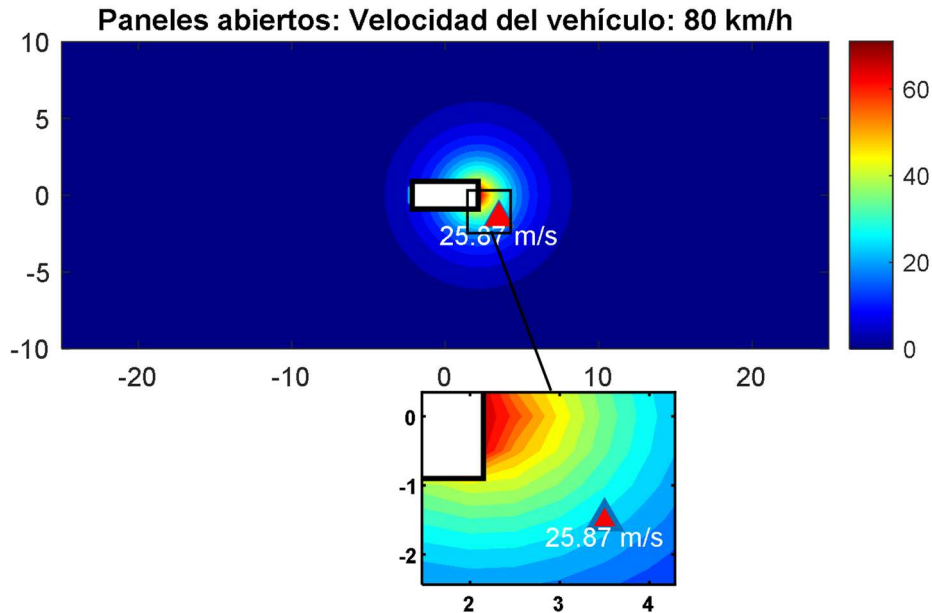


Figura 34. Comportamiento del viento ante el paso de un vehículo que circula a 80 km/h – Paneles abiertos

Fuente: Autor

4.3.2 Análisis con vehículo a 100km/h

Las Figuras 35 y 36 muestran el comportamiento del viento alrededor de un vehículo que se desplaza a 100 km/h en dos configuraciones del cosechador de energía híbrido solar-eólico: paneles cerrados y paneles abiertos. Con los paneles cerrados (Figura 35), la velocidad máxima del viento cerca del cosechador es de 15.97 m/s, representada por un triángulo rojo, con predominio de colores fríos como azules y verdes. En esta configuración, la generación de energía eólica es baja, resultando en menor aceleración del aire y menor eficiencia en la captación de energía.

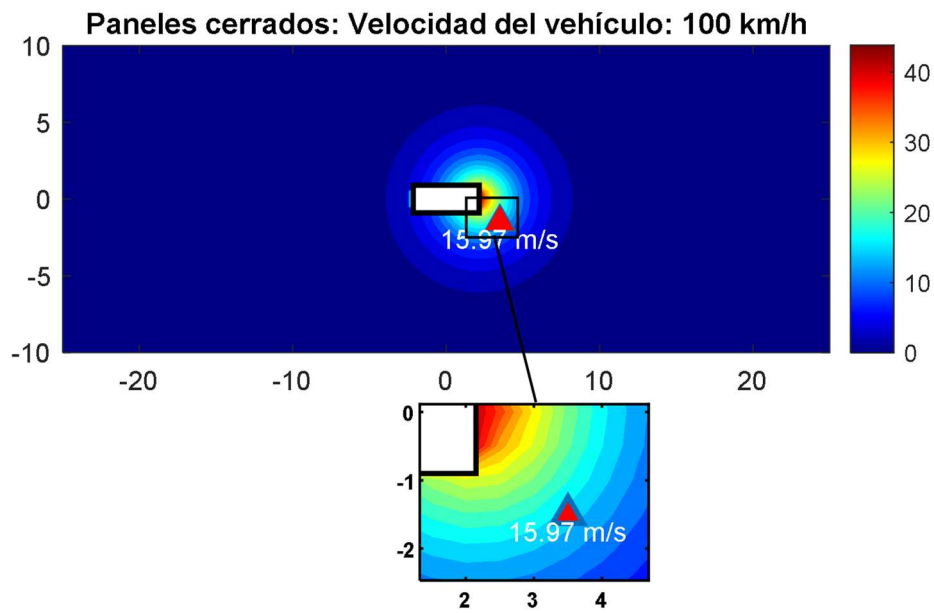


Figura 35. Comportamiento del viento ante el paso de un vehículo que circula a 100 km/h – Paneles cerrados.

Fuente: Autor

En la configuración con paneles abiertos (Figura 36), la velocidad máxima del viento cerca del cosechador alcanza 31.95 m/s, más del doble que con paneles cerrados. Los colores cálidos, como rojos y amarillos, indican una mayor intensidad del flujo de aire. Por lo tanto, la apertura de los paneles mejora significativamente la generación de energía eólica, aumentando la velocidad del viento que llega al cosechador.

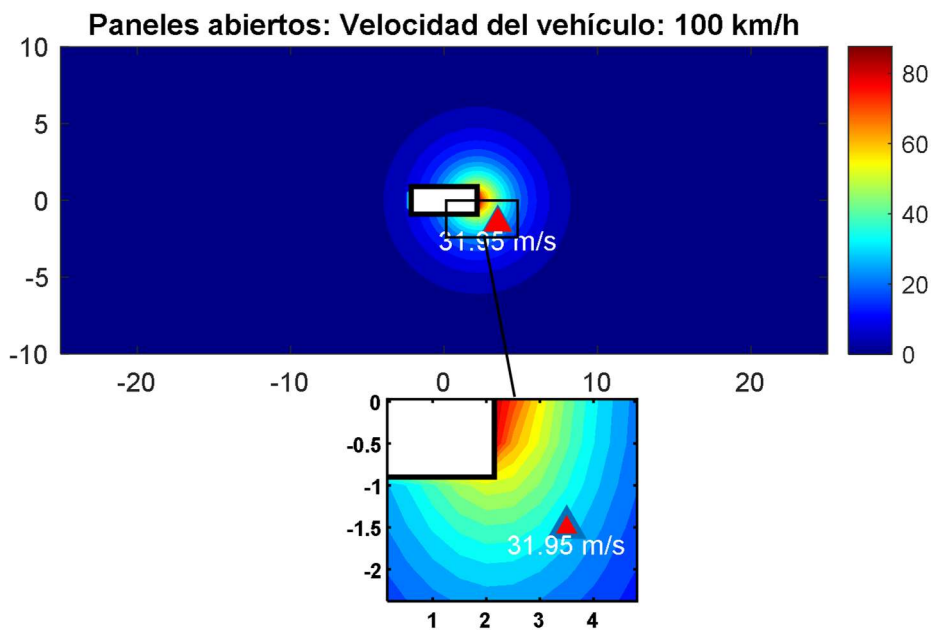


Figura 36. Comportamiento del viento ante el paso de un vehículo que circula a 100 km/h – Paneles abiertos

Fuente: Autor

4.3.3 Análisis con vehículo a 120km/h

Las Figuras 37 y 38 comparan el comportamiento del viento alrededor de un vehículo a 120 km/h en dos configuraciones del cosechador híbrido solar-eólico: paneles cerrados y abiertos. Con los paneles cerrados (Figura 37), la velocidad máxima del viento cerca del cosechador es de 19.01 m/s.

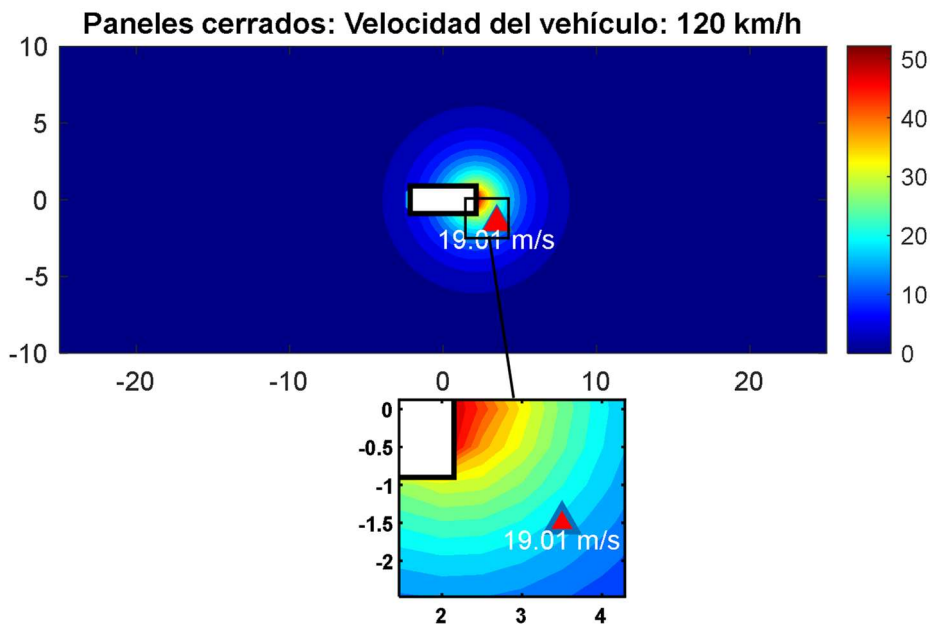


Figura 37. Comportamiento del viento ante el paso de un vehículo que circula a 120 km/h – Paneles cerrados.

Fuente: Autor

Con los paneles abiertos (Figura 38), la velocidad máxima del viento cerca del cosechador aumenta a 38.03 m/s, con tonos rojos y amarillos mostrando una mayor intensidad del flujo de aire. Por lo tanto, es posible afirmar que los paneles abiertos contribuyen significativamente a la generación de energía eólica.

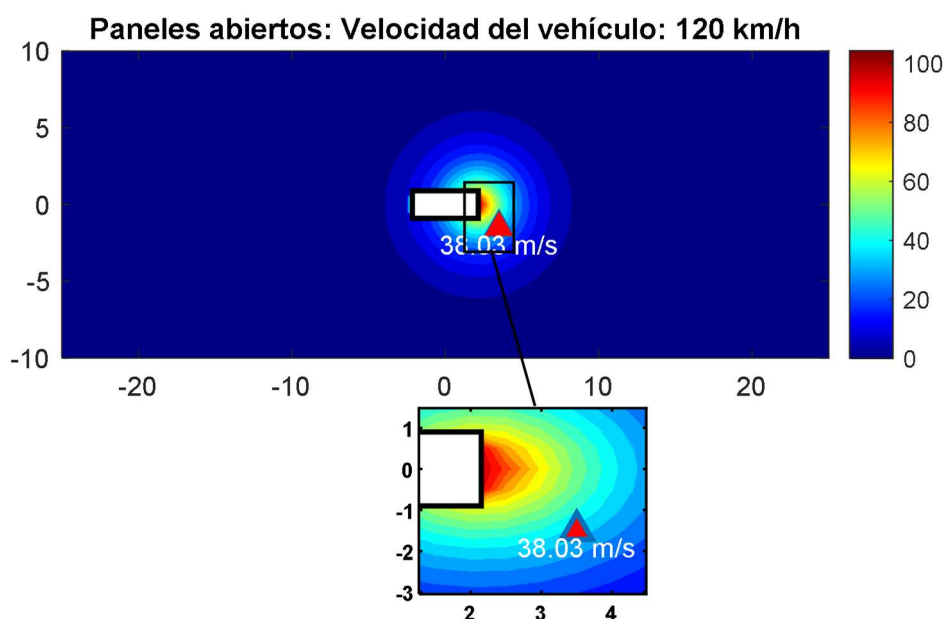


Figura 38. Comportamiento del viento ante el paso de un vehículo que circula a 120 km/h – Paneles abiertos

Fuente: Autor

4.4 Análisis de fuerzas

La Figura 39 muestra un análisis de la velocidad del viento y la fuerza sobre la pala de un sistema de generación eólica ante un vehículo que se desplaza a 80 km/h, comparando las configuraciones con paneles solares abiertos y cerrados. Se observa que, con los paneles abiertos, la velocidad del viento (m/s) es considerablemente mayor, alcanzando aproximadamente 37 m/s a los 9 segundos; mientras que, con los paneles cerrados, la velocidad del viento registra un pico menor de 14 m/s.

En cuanto a la fuerza sobre la pala (N), se nota que, con los paneles abiertos, la fuerza comienza en valores cercanos a 0.04 N y se estabiliza alrededor de 0.5 N. Por otro lado, con los paneles cerrados, la fuerza fluctúa ligeramente alrededor de 0.1 N sin cambios significativos. Esto indica que la configuración con paneles abiertos permite una mayor velocidad del viento y una mayor fuerza sobre la pala, lo que sugiere una mayor eficiencia en la captura de energía eólica. Este comportamiento implica que la posición de los paneles solares tiene un impacto considerable en la aerodinámica y la eficiencia del sistema de generación de energía mientras el vehículo se desplaza a 80 km/h.

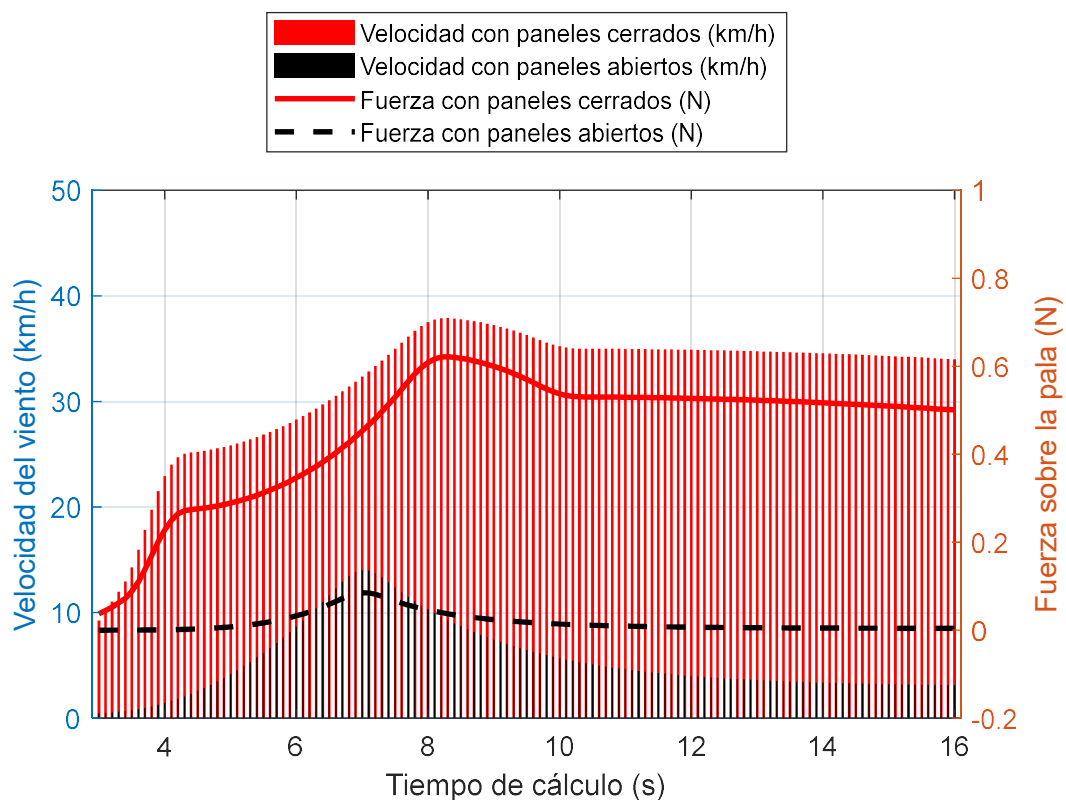


Figura 39. Comportamiento de velocidad y fuerza aplicada al aerogenerador, ante circulación de un vehículo a 80km/h

Fuente: Autor

Por otro lado, la Figura 40 muestra que ante un vehículo que circula a 100 km/h, la velocidad del viento con paneles solares abiertos alcanza un máximo de 47 m/s alrededor de los 8.3 segundos; mientras que, con paneles cerrados, la velocidad máxima es de 17 m/s. Además, se observa que la fuerza sobre la pala con los paneles abiertos incrementa rápidamente, llegando a aproximadamente 0.96 N en el mismo periodo, y luego se estabiliza. En contraste, con los paneles cerrados, la fuerza se mantiene constante alrededor de 0.02 N.

Específicamente, entre los 5 y 10 segundos, la velocidad del viento y la fuerza sobre la pala son significativamente mayores con los paneles abiertos. Este detalle sugiere que la posición abierta de los paneles optimiza la captura de energía eólica debido a la mayor exposición al flujo de aire generado por la velocidad del vehículo.

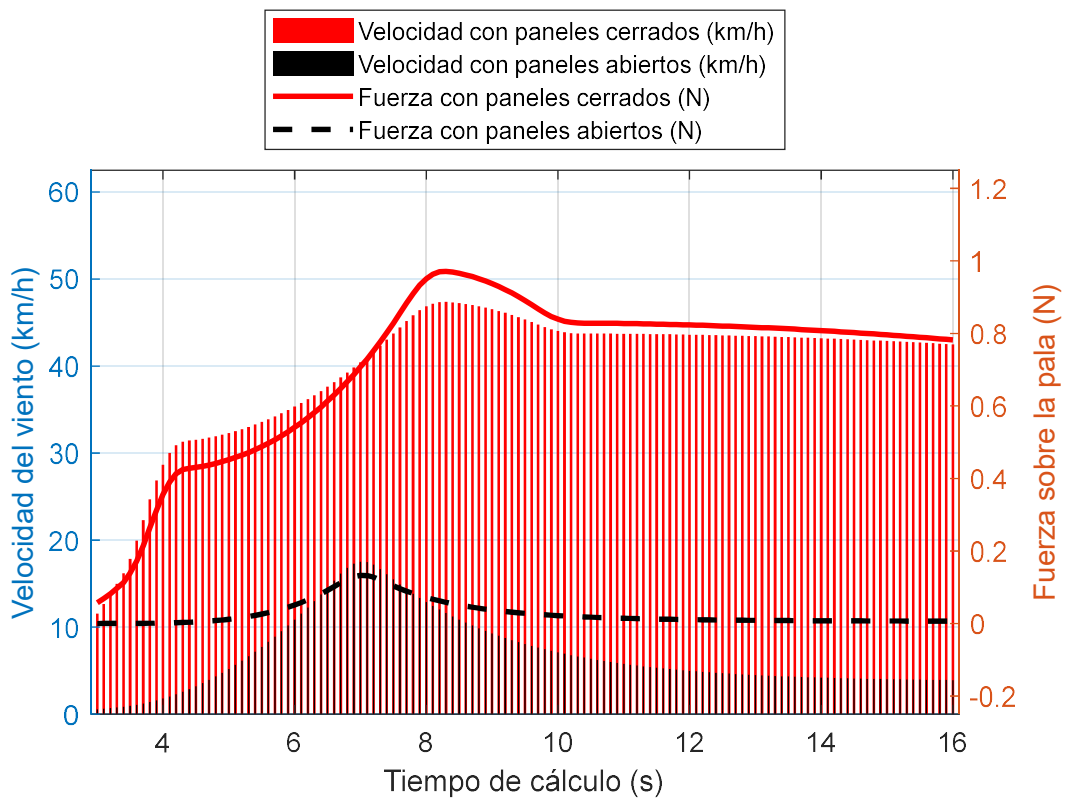


Figura 40. Comportamiento de velocidad y fuerza aplicada al aerogenerador, ante circulación de un vehículo a 100 km/h

Fuente: Autor

Asimismo, la Figura 41 muestra ante un vehículo que circula a 120 km/h, la velocidad del viento con paneles abiertos alcanza un pico de aproximadamente 56 m/s alrededor de los 8.2 segundos; mientras que, con paneles cerrados, la velocidad se mantiene en torno a 21 m/s. Se observa que la fuerza sobre la pala con paneles abiertos incrementa rápidamente hasta llegar a 1.3 N, estabilizándose después de los 8 segundos. En contraste, con los paneles cerrados, la fuerza máxima es de apenas 0.2 N.

Un detalle específico es que durante los primeros 6 segundos, la velocidad del viento y la fuerza sobre la pala aumentan de manera pronunciada con los paneles abiertos, a comparación con los cerrados. Esto sugiere una mayor eficiencia en la captura de energía eólica. Además, la caída en la fuerza y la velocidad después de los 8 segundos con paneles abiertos sugiere una estabilización del sistema.

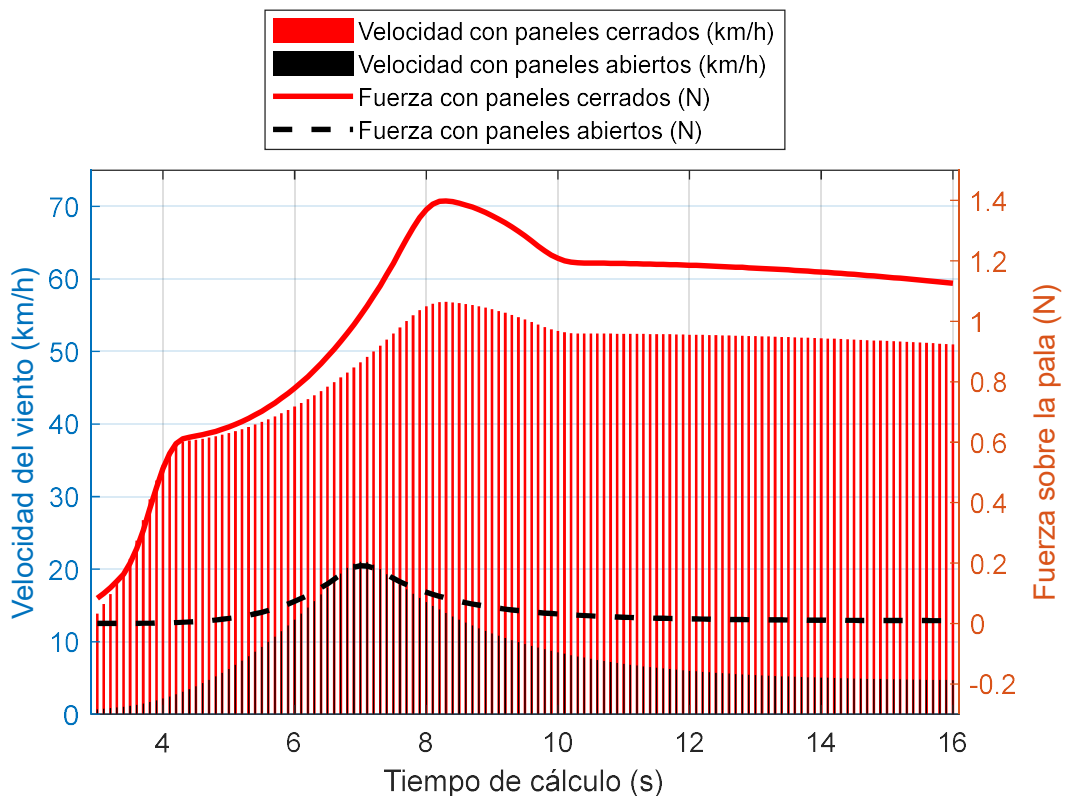


Figura 41. Comportamiento de velocidad y fuerza aplicada al aerogenerador, ante circulación de un vehículo a 120 km/h

Fuente: Autor

4.5 Análisis de tráfico

Para evaluar el potencial de generación de energía de la turbina eólica en la autopista Cuenca-Azogues, se considera una velocidad promedio de 120 km/h. Si bien esta velocidad está por encima de los límites permitidos, se la considero debido a que los radares en el tramo en cuenca – azogues están desactivados y existen registros que los conductores sobrepasan la velocidad permitida que es de 90 km/h (Loza, 2017; Vincés, 2023). Así, la velocidad del viento sobre la turbina es de 38.3 m/s, dentro del rango nominal de la turbina, lo que resulta en una potencia de salida de 12 W. Por otro lado, según el proyecto vial CUENCA – AZOGUES - BIBLIAN, el volumen promedio diario de tráfico se muestra en la Figura 42 (Ministerio de Transporte y obras Públicas, 2019). Además, se asumió una longitud promedio de los vehículos de 4.3 m para calcular el tiempo que pasan por el sistema, resultando en un tiempo de funcionamiento de la turbina de al menos 0.35 s por vehículo. Combinando esta información con la Figura 42, se obtiene la producción mensual de energía eólica, como se muestra en la Figura 43. Por lo tanto, la producción anual del sistema puede alcanzar los 336,000 kWh.

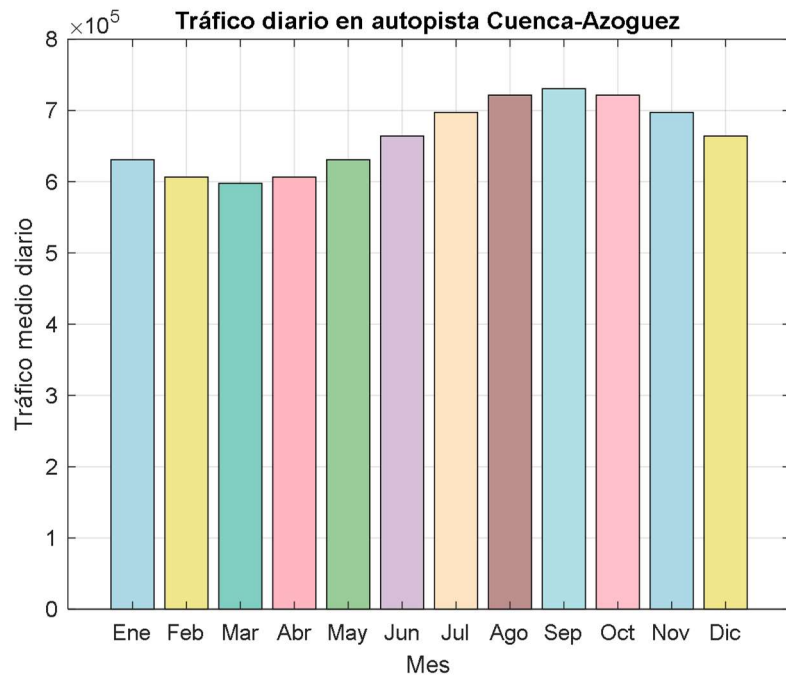


Figura 42. Trafico medio diario en la autopista Cuenca - Azogues

Fuente: (Ministerio de Transporte y obras Públicas, 2019)

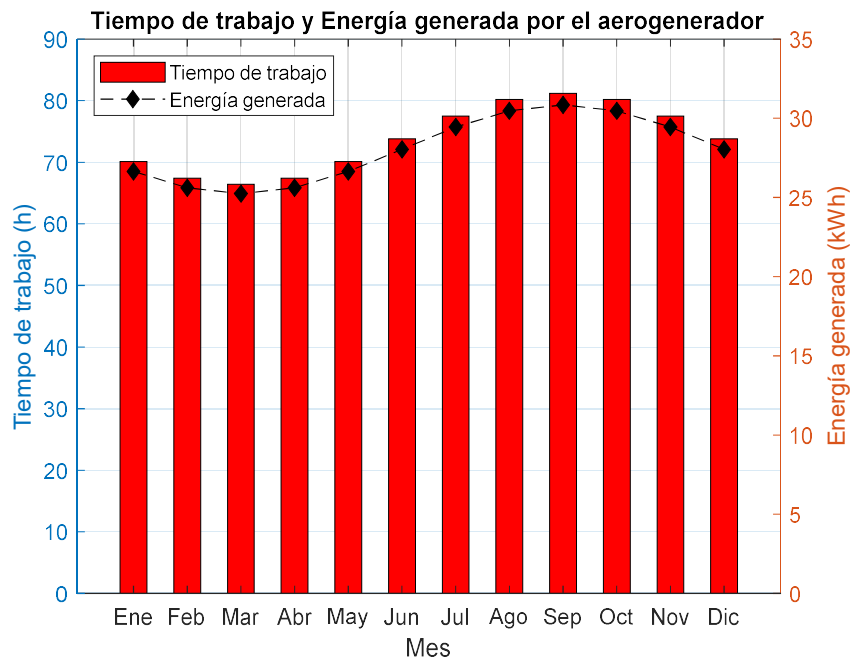


Figura 43. Horas de trabajo y generación de energía eólica en la autopista Cuenca – Azogues.

Fuente: Autor

Por otro lado, la Figura 44 presenta la generación mensual de energía en kWh de dos fuentes renovables: fotovoltaica y eólica, así como la suma de ambas, denominada "Generación total". Los datos se distribuyen de enero a diciembre, donde, la generación fotovoltaica, representada por círculos azules, muestra una producción constante con ligeras

variaciones. En este sentido, la generación más baja ocurre en diciembre y enero (~5 kWh), mientras que el pico se alcanza entre junio y septiembre (~7 kWh). Por otro lado, la generación eólica, representada por triángulos rojos, también es relativamente estable, pero muestra un aumento gradual hasta el otoño, con un pico de alrededor de 30 kWh en septiembre y una ligera disminución hacia el final del año. La suma de ambas fuentes, representada por diamantes grises, muestra una tendencia ascendente hasta septiembre (~37 kWh), seguida de una ligera disminución, manteniéndose alta (~35 kWh) hasta diciembre.

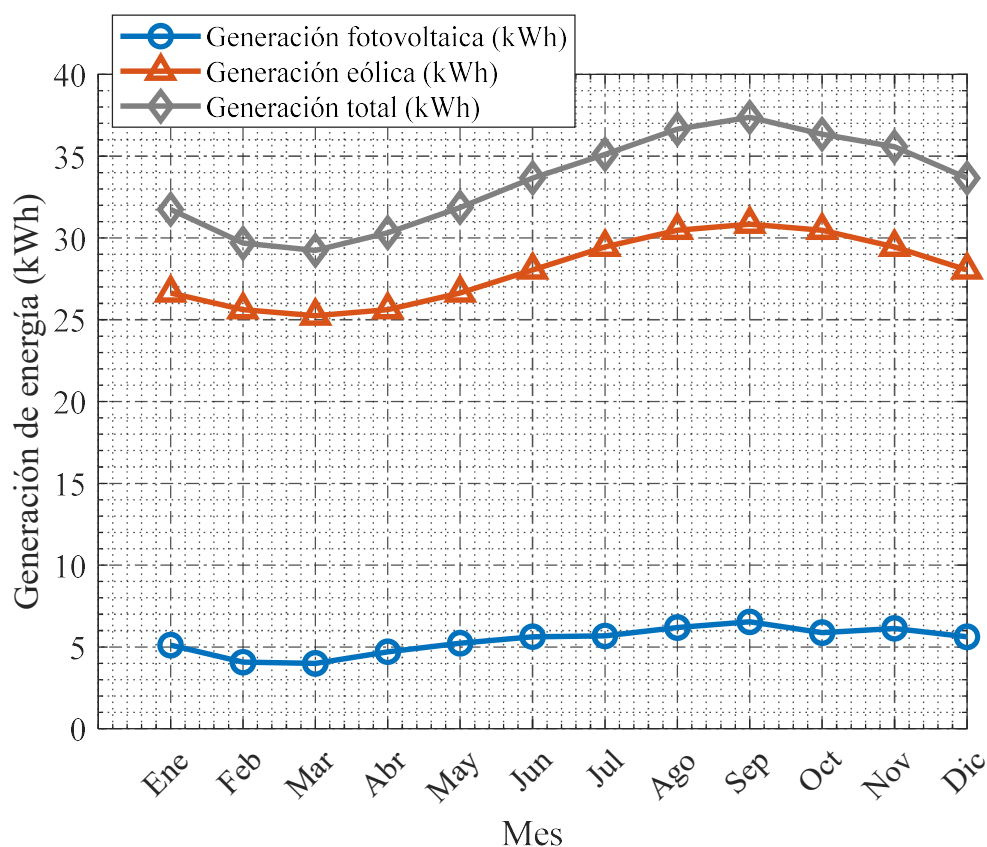


Figura 44. Generación total de energía de tecnología híbrida fotovoltaica/eólica en autopista cuenca azogues

Fuente: Autor

4.6 Producción de energía estimada por zona

Se puede inferir que la energía generada por los recolectores de energía puede ser completamente utilizada por las instalaciones eléctricas de la autopista Cuenca-Azogues. Para distintos puntos de la carretera, la distribución de los recolectores se determina en función de la capacidad de sus instalaciones eléctricas y los costos de instalación. Por lo tanto, el sistema híbrido propuesto es aplicable en varios puntos y, para cada punto específico, siempre habrá una configuración óptima. De acuerdo con el flujo de tráfico y las condiciones de sol en diferentes regiones, se puede calcular la producción anual de energía solar y eólica

del sistema híbrido en los distintos puntos de la autopista Cuenca-Azogues de la siguiente manera:

$$E_{S-year-i} = 2563704 * \left(\frac{R_{y-i}}{911}\right) * \left(\frac{M_{H-i}}{337.5}\right) \quad (51)$$

$$E_{w-year-i} = 289550 * \sqrt{\frac{T_{flow-i}}{8686500} * \frac{M_{H-i}}{337.5}} \quad (52)$$

En este sentido, $E_{S-year-i}$ y $E_{w-year-i}$ son la producción anual de energía solar y eólica en el punto i de la autopista cuenca-azogues, respectivamente; R_{y-i} , M_{H-i} y T_{flow-i} son la radiación solar anual, la longitud total de la vía rápida y el flujo de tráfico en el lugar i . Por lo tanto, la producción total de energía de toda la red vial en Ecuador global (E_{sum}) se puede calcular mediante la siguiente expresión.

$$E_{sum} = \sum_{i=1}^{31} (E_{S-year-i} + E_{w-year-i}) \quad (53)$$

Los resultados del cálculo se ilustran en la Figura 45. Esta indica que, debido a la mínima diferencia en la radiación solar entre distintas regiones, la producción solar se ve mayormente influenciada por la longitud de la autopista. En cuanto a la generación de energía eólica, esta es impulsada por el movimiento de los vehículos, por lo que aumenta con el incremento del tráfico. Al comparar con otras regiones, puntos como Control Sur, Redondel 12 de octubre, Redondel de Turi, Redondel del Vergel, Entrada al Valle, Redondel del IESS, Zoológico Amaru, Mega tienda del Sur, Bomba de gasolina de Challuabamba y Entrada a Paccha presentan mayor potencial para la recuperación de energía.

En general, se estima que la producción anual de energía eólica y solar puede alcanzar hasta 99 kWh y 75 kWh (ver Figura 46), respectivamente. Además, al instalar el sistema híbrido en la mediana de la autopista, no se requiere terreno adicional, lo que permite ahorrar costos relacionados con la ocupación de tierras. Los resultados y análisis anteriores sugieren que este recolector de energía híbrido eólico-fotovoltaico es prometedor para su aplicación en autopistas y puede generar grandes beneficios energéticos.

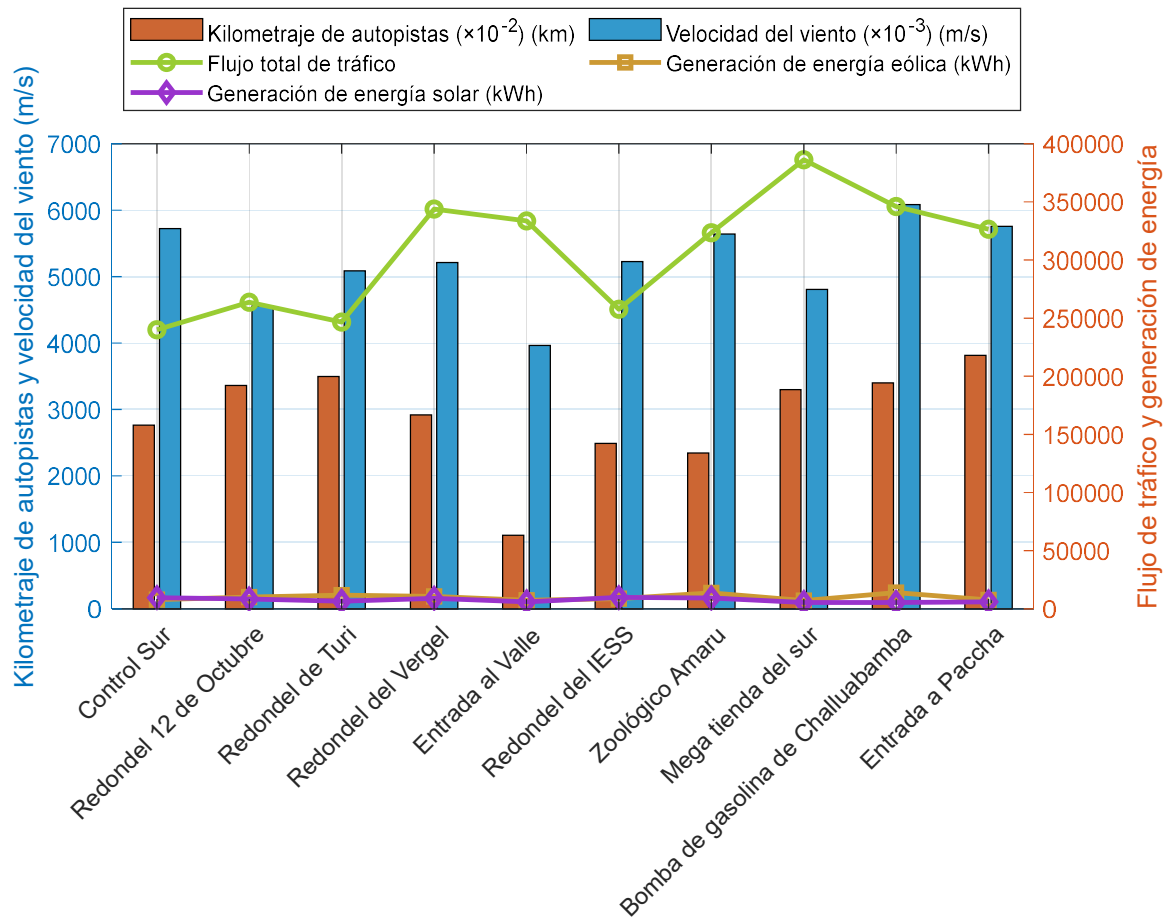


Figura 45. Potencial estimado de generación de tecnología híbrida fotovoltaica/eólica en autopista cuenca azogues

Fuente: Autor

Generación de energía eólica vs. solar

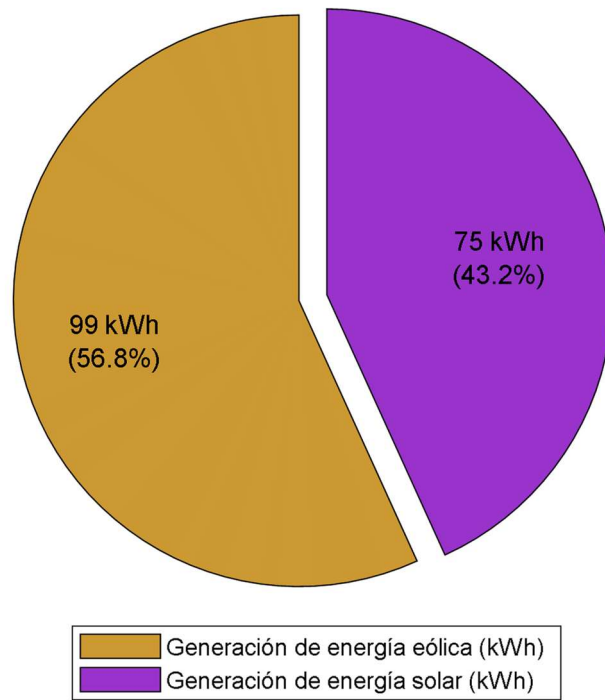


Figura 46. Estimación de generación tecnología híbrida fotovoltaica/eólica en autopista cuenca azogues

Fuente: Autor

5 CONCLUSIONES

La determinación de la carga energética de las luminarias en la zona designada de la vía Cuenca – Azogues reveló que la instalación de 1890 luminarias LED de 150W cada una resultó en una carga total de 283.5 kW. Estas luminarias operaron durante 12 horas diarias, lo que llevó a un consumo energético diario de 3402 kWh, mensual de 102,060 kWh y anual de 1,241,730 kWh. Este análisis preciso de la carga energética permitió dimensionar el sistema híbrido eólico/fotovoltaico de manera eficiente, asegurando que se cumplan con los requisitos de alumbrado público.

El análisis de las condiciones climáticas en la vía Cuenca – Azogues, centrado en la medición de la irradiancia solar y la velocidad del viento, reveló datos necesarios para el diseño del sistema híbrido eólico/fotovoltaico. Se determinó que la velocidad media anual del viento es de 2.46 m/s, con picos de hasta 3.47 m/s, mostrando variabilidad diaria significativa y alcanzando máximos alrededor de las 20:00 a 22:00 horas. La irradiancia solar mostró valores más altos en los meses de verano, con horas solares pico de 3.528 y 3.451 horas diarias en junio y julio, respectivamente. Estos datos indican que la región tiene un potencial significativo tanto para la energía eólica como para la fotovoltaica.

El diseño del sistema híbrido que combine de manera eficiente la energía eólica y fotovoltaica para el alumbrado público en la vía Cuenca – Azogues se ha logrado mediante un enfoque detallado y técnico. Para lo cual, se ha desarrollado un sistema que integra una turbina eólica de eje vertical (VAWT) y paneles fotovoltaicos flexibles, optimizando la captación de energía renovable. El sistema fue dimensionado para una carga total de 283.5 kW, basada en 1890 luminarias LED de 150W, y su rendimiento fue evaluado utilizando el software MATLAB. Los resultados de las simulaciones indicaron que la energía generada anualmente por los paneles fotovoltaicos es de 99 kWh, mientras que la turbina eólica genera 75 kWh, totalizando 174 kWh .

El análisis de las simulaciones realizado con MATLAB para evaluar el rendimiento y la eficacia del sistema híbrido eólico/fotovoltaico en la vía Cuenca – Azogues indicó que el sistema propuesto es técnicamente viable. Los resultados mostraron que, al considerar una velocidad promedio del tráfico de 120 km/h, la velocidad del viento sobre la turbina alcanzó 38.3 m/s, lo que resultó en una potencia de salida de 12 W por vehículo que pasa. El volumen promedio diario de tráfico en esta vía, según el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, asegura un funcionamiento continuo de las turbinas eólicas. Además, la producción anual combinada de energía eólica y fotovoltaica se estimó en 336,000 kWh.

6 RECOMENDACIONES

Sería oportuno realizar estudios futuros para optimizar el diseño del sistema híbrido eólico/fotovoltaico, enfocándose en el análisis detallado de diferentes configuraciones y tecnologías emergentes. Tecnologías como la turbina eólica sin aspas (Unblessed Wind Turbine) ofrecen una opción prometedora para reducir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia. Además, se sugiere complementar el análisis eléctrico con el uso de software avanzado como ANSYS y CFD (Computational Fluid Dynamics), que permiten realizar simulaciones precisas del flujo de aire y el comportamiento estructural de los componentes del sistema.

Se sugiere llevar a cabo estudios más detallados sobre el impacto del tráfico vehicular en la generación de energía eólica, utilizando datos de tráfico a largo plazo y en diferentes tramos de la vía Cuenca – Azogues. Este enfoque permitirá ajustar y optimizar la ubicación y configuración de las turbinas eólicas para maximizar la captación de energía. Además, se recomienda explorar la implementación de sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real para evaluar el rendimiento del sistema y ajustar los parámetros operativos según las variaciones del tráfico.

Se recomienda desarrollar, utilizar modelos climáticos y meteorológicos detallados para predecir con mayor precisión la disponibilidad de recursos eólicos y solares en la región. Estos modelos pueden mejorar la planificación y optimización del sistema híbrido, asegurando que se adapten eficazmente a las condiciones climáticas cambiantes. Además, se sugiere realizar estudios comparativos con otras regiones con condiciones climáticas similares para validar los resultados y adaptar las mejores prácticas.

Es necesario realizar una evaluación económica y ambiental detallada del sistema híbrido a largo plazo, considerando no solo los costos iniciales de implementación, sino también los beneficios económicos y ambientales derivados de la reducción de emisiones de carbono y la disminución de la dependencia de fuentes de energía no renovables. Estudios futuros deberían incluir análisis de ciclo de vida (LCA) y evaluaciones de impacto ambiental (EIA) para cuantificar los beneficios sostenibles del sistema, promoviendo su adopción en otras regiones y proyectos similares.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, A., Hosseini, S., Somwangthanaroj, A., Cheacharoen, R., Olaru, S., & Kheawhom, S. (2020). Discharge profile of a zinc-air flow battery at various electrolyte flow rates and discharge currents. *Scientific Data*, 7(1), 196. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0539-y>
- Afonaa, S., Wang, Q., & Uzoejinwa, B. B. (2019). Investigation of Daytime Peak Loads to Improve the Power Generation Costs of Solar-Integrated Power Systems. *International Journal of Photoenergy*, 2019, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2019/5986874>
- Aghaei, M., Kumar, N. M., Eskandari, A., Ahmed, H., de Oliveira, A. K. V., & Chopra, S. S. (2020). Solar PV systems design and monitoring. In *Photovoltaic Solar Energy Conversion* (pp. 117–145). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00005-3>
- Akbar, F. K., & Rohman, F. (2020). Analisis Variasi Nilai Duty Cycle pada PWM Terhadap Durasi Pengisian Baterai Lithium-Ion dan Lithium-Polymer. *JASIEK (Jurnal Aplikasi Sains, Informasi, Elektronika Dan Komputer)*, 2(1). <https://doi.org/10.26905/jasiek.v2i1.3596>
- Alaaeddin, M. H., Sapuan, S. M., Zuhri, M. Y. M., Zainudin, E. S., & M. AL-Oqila, F. (2019). Development of Photovoltaic Module with Fabricated and Evaluated Novel Backsheet-Based Biocomposite Materials. *Materials*, 12(18), 3007. <https://doi.org/10.3390/ma12183007>
- Alave-Vargas, E. M., Orellana Lafuente, R., Sempértegui-Tapia, D. F., Alave-Vargas, E. M., Orellana Lafuente, R., & Sempértegui-Tapia, D. F. (2022). Estado del arte sobre aerogeneradores de eje vertical. *Investigación & Desarrollo*, 22(1), 161–172. <https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-13i>
- Alfaro, G., Regueiro Ferreira, R., Gómez Villarino, M. T., & Gómez Catasús, J. (2023). *Tecnología y sostenibilidad de la energía eólica. {Preguntas} y respuestas* (1ra edición). Ediciones Mundi-Prensa.
- Ali, N. M., & Ammari, H. (2022). Design of a hybrid wind-solar street lighting system to power LED lights on highway poles. *AIMS Energy*, 10(2), 177–190. <https://doi.org/10.3934/energy.2022010>
- Alkalbani, R. H., & Gani, B. A. (2022). Hybrid Model of Solar and Wind Energy for Powering Street Lights: Feasibility Study. *International Journal on Engineering, Science and Technology*, 150–156. <https://doi.org/10.46328/ijonest.88>

- Amir, M. S., Rahman, M. O., & Khan, M. Z. R. (2022). A Mathematical Modelling of Discharge and Charge Phenomena of A Lead-Acid Battery. *2022 12th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, 332–335. <https://doi.org/10.1109/ICECE57408.2022.10088834>
- Anitha, P., Selvakumar, B., Kamaraja, A. S., & Kumar, K. K. (2023). Independent PV-Battery Systems by Combining Autonomous Incremental Conductance Particle Swarm Technique with a Power Management Circuitry. *2023 7th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICOEI56765.2023.10125591>
- Atlas solar. (2024). *Global wind atlas*.
- Bai, J., Liu, Y., Feng, J., Tang, M., & Luo, W. (2023). An Intelligent Street Lamp for Road Lighting and Vehicle Charging Based on Wind-Solar Hybrid Power. *2023 Panda Forum on Power and Energy (PandaFPE)*, 2210–2214. <https://doi.org/10.1109/PandaFPE57779.2023.10140751>
- Bangun, G. M., Nabila, N., Budiansyah, M. A., Alvianingsih, G., & Utomo, A. R. (2019). Study of Battery Sizing for Solar Power Plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 353(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/353/1/012004>
- Bangura, A. A., Errouha, M., Hihhi, H., & Chalh, Z. (2023). Modelling and Simulation of the Hybrid System PV-Wind. *Statistics, Optimization and Information Computing*, 11(1), 143–153. <https://doi.org/10.19139/soic-2310-5070-1535>
- Benda, V., & Černá, L. (2020). PV cells and modules – State of the art, limits and trends. *Heliyon*, 6(12), e05666. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05666>
- Bernal, L., & Icaza, D. (2021). Diseño del sistema fotovoltaico para la iluminación ornamental de la iglesia de Turi - Cuenca [Universidad Católica de Cuenca]. In *Universidad Católica de Cuenca*. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/9712>
- Bhuyarkar, S., Kharkate, R., Raut, R., Ganvir, S., Borkar, E., Kumbhare, R., & Talmale, A. (2023). IoT Based Hybrid Street Light Generation Using Solar and Wind Energy. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 05, 3832–3835. <https://doi.org/10.56726/irjmets39330>
- Brar, A., Sanborn, R., Radwan, A., & Jiang, X. (2020). A Mobile Photovoltaic-Battery System for Off-Grid Applications. *2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICECCE49384.2020.9179339>

- Brito, J., & Icaza, D. (2017). *Análisis de factibilidad para la implementación de sistemas híbridos (Eólico-fotovoltaico) en las inmediaciones del centro patrimonial de Quingeo y zona arqueológica Curiquinga*. [Universidad Católica de Cuenca].
<https://dspace.ucacue.edu.ec/server/api/core/bitstreams/65c8c984-329d-494a-9d92-090042fb8edb/content>
- CELEC. (2023). *Central {Eólica} {Villonaco}*. <https://www.celec.gob.ec/gensur/informacion-tecnica/central-eolica-villonaco/>
- CENTROSUR. (2023). *CENTROSUR mejora iluminación de la vía rápida con 1890 nuevas luminarias*. <https://www.centrosur.gob.ec/centrosur-mejora-iluminacion-de-la-via-rapida-con-1890-nuevas-luminarias/>
- Chen, X., Chu, A., Li, D., Yuan, Y., Fan, X., & Deng, Y. (2021). Development of the cycling life model of Ni-MH power batteries for hybrid electric vehicles based on real-world operating conditions. *Journal of Energy Storage*, 34, 101999.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101999>
- Cheng, X., Lei, M., Wen, L., & Chen, Z. (2020). Battery Evaluation Based on Mechanism Parameters. *2020 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the Era of Artificial Intelligence (ICSMD)*, 194–197.
<https://doi.org/10.1109/ICSMD50554.2020.9261756>
- Córdova-González, F., García Meléndez, E., Ferrer Juliá, M., & Icaza, D. (2024). Analysis for the Implementation of Distributed Renewable Energy Generation Systems for Areas of High Vulnerability Due to Hillside Movements: Case Study of Marianza-Cuenca, Ecuador. *Energies*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/en17071633>
- David, J., & Villarreal, Y. (2018). VIV resonant wind generators. *Www.Vortexbladeless.Com*, 2(1), 1–6. www.vortexbladeless.com
- Deceased, J. A. D., & Beckman, W. A. (2020). Front Matter. In *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781119540328.fmatter>
- Díaz Rocano, D., & Toapanta Chicaiza, A. (2020). *Eje vertical tipo savonius y darrieus, mediante dinámica computacional ({CFD}) para determinar la eficiencia y condiciones de operación de la generación eólica* [Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE].
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/23114/1/T-ESPEL-EMI-0391.pdf>
- DTU Wind Energy, & World Bank Group. (2024). *Global Wind Atlas*. Global Wind Atlas.
<https://globalwindatlas.info/es/>

- Dutta, J., Das, R., Saha, A., Boruah, R., Deori, R., & Sunkrang, L. (2023). Solar Photovoltaic System For Low-Power Residential Applications. *2023 11th National Power Electronics Conference (NPEC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/NPEC57805.2023.10385013>
- ElecAustro. (2022). *Parque {Eólico} {Minas} de {Huascachaca} – {ELECAUSTRO}*. <https://www.elecaustro.gob.ec/proyectos/proyecto-eolico-minas-de-huascachaca/>
- Elprocus. (2020). *Savonius Wind Turbine - Design, Working, Benefits & Drawbacks*. <https://www.elprocus.com/what-is-a-savonius-wind-turbine-design-its-working/>
- Elsarrag, E., Pernau, H., Heuer, J., Roshan, N., Alhorr, Y., & Bartholomé, K. (2019). Spectrum splitting for efficient utilization of solar radiation: a novel photovoltaic–thermoelectric power generation system. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s40807-015-0016-y>
- Estaji, A., & Sauter, T. (2022). Street Lighting Simulation for Energy Efficiency Improvement. *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ETFA52439.2022.9921570>
- Fatullah, M. A., Rahardjo, A., & Husnayain, F. (2019). Analysis of Discharge Rate and Ambient Temperature Effects on Lead Acid Battery Capacity. *2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICIRD47319.2019.9074667>
- First Light. (2024). *Solar Street Lights & Parking Lot Lighting - LED First Light*. <https://www.firstlighttechnologies.com/solar-lighting-products/bfls-solar-street-light/>
- FlexSol. (2024). *Light years ahead in smart solar power technology*. <https://flexsolutions.com/>
- Gafar, H. (2019). 1.8 MW rooftop solar photovoltaic power plant. *Bulletin of NTU “Kharkiv Polytechnic Institute” Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion*, 0(20 (1345)), 35–41. <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.20.05>
- Galindo, S. P., Borge-Diez, D., & Icaza, D. (2022). Energy sector in Ecuador for public lighting: Current status. *Energy Policy*, 160(March 2021), 112684. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112684>
- Ganthia, B. P., Barik, S. K., & Nayak, B. (2021). Wind {Turbines} in {Energy} {Conversion} {System}: {Types} \& {Techniques}. In V. K. Singh, A. K. Bhoi, A. Saxena, A. F. Zobia, & S. Biswal (Eds.), *Renewable {Energy} and {Future} {Power} {Systems}* (pp. 199–217). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6753-1_9
- Ghosh, K., & Banerjee, S. (2022). A Study on The Effect of Light on Prevention of Road

- Accident and Promotion of Pedestrian Safety. *Indian Science Cruiser*, 36(4), 26.
<https://doi.org/10.24906/isc/2022/v36/i4/216417>
- Google Maps. (2024). *El Tambo*. Google. <https://www.google.com/maps/place/El+Tambo/@-4.1036578,-79.3696349,46455m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x91cb33ee012e6ce9:0x29203d7d621109c0!8m2!3d-4.0991305!4d-79.2676668>
- Green Home Gnome. (2019). *5 Top Wind Turbines for Low Wind Speeds - Green Home Gnome*. <https://www.greenhomegnome.com/wind-turbines-low-wind-speeds/>
- Greenshine. (2024). *Solar Street Light For Sale, China Solar Street Light Manufacturer | Anern*. <https://www.anerngroup.com/products/solar-street-light/>
- Hao, F., Liu, Z., Balbuena, P. B., & Mukherjee, P. P. (2019). Mesoscale Elucidation of Self-Discharge-Induced Performance Decay in Lithium–Sulfur Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(14), 13326–13333. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b02282>
- Hao, S., Cai, Y., Bai, J., Xu, C., Wu, Y., Luo, L., & Yu, L. (2023). A digital photovoltaic station operation monitoring and management system based on communication technology. In X. Qu (Ed.), *Third International Conference on Electronics, Electrical and Information Engineering (ICEEIE 2023)* (p. 100). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3009105>
- Harold, D., Jesus, J. L., & Esguerra, M. P. (2023). Optimal Economic Dispatch of Hybrid Distributed Generators with Battery Energy Storage System using a Modified Meta Heuristic Algorithm. *Proceedings of 2023 the 13th International Workshop on Computer Science and Engineering*. <https://doi.org/10.18178/wcse.2023.06.052>
- Hasan, M., & Serra, A. (2023). Current and future prospective for battery controllers of solar PV integrated battery energy storage systems. *Frontiers in Energy Research*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1139255>
- Hassan, Q., Pawela, B., Hasan, A., & Jaszczur, M. (2022). Optimization of Large-Scale Battery Storage Capacity in Conjunction with Photovoltaic Systems for Maximum Self-Sustainability. *Energies*, 15(10), 3845. <https://doi.org/10.3390/en15103845>
- Hassani, H., Zaouche, F., Rekioua, D., Belaid, S., Rekioua, T., & Bacha, S. (2020). Feasibility of a standalone photovoltaic/battery system with hydrogen production. *Journal of Energy Storage*, 31, 101644. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101644>
- Hlal, M. I., Ramachandaramurthy, V. K., Sarhan, A., Pouryekta, A., & Subramaniam, U. (2019). Optimum battery depth of discharge for off-grid solar PV/battery system. *Journal of Energy Storage*, 26, 100999. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100999>

- Hossain, J., Algeelani, N. A., Hamood Al-Masoodi, A. H., & Kadir, A. F. A. (2022). Solar-wind power generation system for street lighting using internet of things. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 26(2), 639–647. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v26.i2.pp639-647>
- Icaza-Alvarez, D., Jurado, F., Flores, C., & Ortiz, G. R. (2023). Ecuadorian electrical system: Current status, renewable energy and projections. *Heliyon*, 9(5), e16010. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16010>
- Jadhav, D. R., & Patil, D. (2022). State of Charge Estimation of Electrical Vehicle Battery. *2022 Interdisciplinary Research in Technology and Management (IRTM)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/IRTM54583.2022.9791627>
- Ji, D., Chen, L., Ma, T., Wang, J., Liu, S., Ma, X., & Wang, F. (2019). Research on adaptability of charging strategy for electric vehicle power battery. *Journal of Power Sources*, 437, 226911. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.226911>
- Jiang, Y., Shuai, Y., He, X., Wen, X., & Lou, L. (2021). An Energy-Efficient Street Lighting Approach Based on Traffic Parameters Measured by Wireless Sensing Technology. *IEEE Sensors Journal*, 21(17), 19134–19143. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3089208>
- Jing, W., Lai, C. H., Ling, D. K. X., Wong, W. S. H., & Wong, M. L. D. (2019). Battery lifetime enhancement via smart hybrid energy storage plug-in module in standalone photovoltaic power system. *Journal of Energy Storage*, 21, 586–598. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.12.007>
- Jurasz, J., Ceran, B., & Orłowska, A. (2020). Component degradation in small-scale off-grid PV-battery systems operation in terms of reliability, environmental impact and economic performance. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38, 100647. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100647>
- Khan, A., Naqvi, I. H., & Ul Hassan, N. (2022). Towards Making Intelligent Decisions on SOC Strategies for EV Battery Life Enhancement under Practical DoD Ranges. *2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, 295–299. <https://doi.org/10.1109/ISGTAsia54193.2022.10003594>
- Knap, V., Molhanec, M., Gismero, A., & Stroe, D.-I. (2021). Calendar Degradation and Self-Discharge Occurring During Short- and Long-Term Storage of NMC Based Lithium-Ion Batteries. *ECS Transactions*, 105(1), 3–11. <https://doi.org/10.1149/10501.0003ecst>
- Li, M., Wang, X., & Sun, Q. (2023). Research on photovoltaic system faults detection strategy based on memory network. In M. Shakir Md Saat & M. Bin Ibne Reaz (Eds.),

- Second International Conference on Energy, Power, and Electrical Technology (ICEPET 2023)* (p. 148). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3004451>
- Liu, H., Chen, F., Tong, Y., Wang, Z., Yu, X., & Huang, R. (2020). Impacts of Driving Conditions on EV Battery Pack Life Cycle. *World Electric Vehicle Journal*, 11(1), 17. <https://doi.org/10.3390/wevj11010017>
- Liu, W. (2023). Key technologies for photovoltaic power generation. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 43, 74–83. <https://doi.org/10.54097/hset.v43i.7407>
- Loza, D. (2017). Tránsito y seguridad en la autopista Cuenca-Azogues. *Lola Malverde*, 1–85. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/989/1/tof9.pdf>
- Macas, H., Sánchez, A., & Icaza, D. (2022). Abastecimiento de energía mediante un sistema solar fotovoltaico para el centro médico comunitario de punta hacienda – Quingeo [Universidad Católica de Cuenca]. In *Universidad Católica de Cuenca*. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/9712>
- Madani, S., Soghrati, R., & Ziebert, C. (2022). A Regression-Based Technique for Capacity Estimation of Lithium-Ion Batteries. *Batteries*, 8(4), 31. <https://doi.org/10.3390/batteries8040031>
- Makemu. (2024). *Wind generator EOLO 1KW_ 2KW_ 3KW - Makemu*. <https://www.makemu.it/prodotto/wind-generator-eolo/?lang=en>
- Mathew, S., & Philip, G. S. (2012). Wind Turbines. In *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 93–111). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00205-5>
- Megantoro, P., Syahbani, M. A., Sukmawan, I. H., Perkasa, S. D., & Vigneshwaran, P. (2022). Effect of peak sun hour on energy productivity of solar photovoltaic power system. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 11(5), 2442–2449. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i5.3962>
- MeteoBlue. (2024). *Simulated historical climate & weather data for 2.92°S 79.01°W*. <https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/climatemodelled/-2.920N-79.014E>
- Ministerio de Transporte y obras Públicas. (2019). *Proyecto: vía cuenca – azogues -biblián 1. 2*.
- Morocho, C., Correa, J., & Icaza, D. (2021). Implementación de energía fotovoltaica para sistemas de iluminación en monumentos turísticos [Universidad Católica de Cuenca]. In *Universidad Católica de Cuenca*. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/9712>
- Moy, K., Lee, S. B., & Onori, S. (2021). Characterization and Synthesis of Duty Cycles for

- Battery Energy Storage Used in Peak Shaving Dispatch. *ASME Letters in Dynamic Systems and Control*, 1(4). <https://doi.org/10.1115/1.4050192>
- Najafi-Shad, S., Barakati, S. M., & Yazdani, A. (2020). An effective hybrid wind-photovoltaic system including battery energy storage with reducing control loops and omitting PV converter. *Journal of Energy Storage*, 27, 101088. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101088>
- Naqvi, A. A., Bin Nadeem, T., Ahmed, A., & Ali Zaidi, A. (2021). Designing of an off-grid Photovoltaic system with battery storage for remote location. *TECCIENCIA*, 16(31), 15–28. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2021.31.2>
- NASA. (2023). *POWER | DAVe*. <https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer/>
- Nicola, A., Vitan, C., Aron, C., Matei, D., & Grecea, I. (2021). Study of photovoltaic systems using modelling and simulation. *MATEC Web of Conferences*, 342, 03007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134203007>
- Nithish, R. P., Jayakiran, R., & Srinivasulu, R. (2023). Design and Validation of Off-grid Photovoltaic Systems for Domestic Applications: A Case Study. *NanoWorld Journal*, 9. <https://doi.org/10.17756/nwj.2023-s4-052>
- Parihar, L., Madhu, A., Debnath, D., Roy, R., & Choudhury, T. R. (2021). Least Component Count Off-Grid Solar Photovoltaic Scheme for Rural Household Application. *2021 National Power Electronics Conference (NPEC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/NPEC52100.2021.9672501>
- Peters, I. M., Breyer, C., Jaffer, S. A., Kurtz, S., Reindl, T., Sinton, R., & Vetter, M. (2021). The role of batteries in meeting the PV terawatt challenge. *Joule*, 5(6), 1353–1370. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.023>
- Philips. (2024). *Maximize Savings with Advanced Philips Solar Lighting Products Philips lighting*. <https://www.lighting.philips.com/application-areas/specialist-applications/solar>
- Pillai, P., Sundaresan, S., Kumar, P., Pattipati, K. R., & Balasingam, B. (2022). Open-Circuit Voltage Models for Battery Management Systems: A Review. *Energies*, 15(18), 6803. <https://doi.org/10.3390/en15186803>
- Primicias. (2024). Los cortes de luz en {Ecuador} se suspenden hasta el 1 enero de 2024. In *Primicias*. <https://www.primicias.ec/noticias/economia/cortes-luz-enero-ano-nuevo-navidad/>
- Pulla Galindo, S., Icaza, D., & Flores-Vázquez, C. (2021). Energy Savings in Public Lighting, Reduction of Light and Atmospheric Pollution in the City of Cuenca-Ecuador. *Lecture*

Notes in Electrical Engineering, 762 LNEE, 94–105. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72208-1_8

- PV Magazine. (2024). *Cylindrical solar panel for street lighting – pv magazine International*. <https://www.firstlighttechnologies.com/solar-lighting-products/bfls-solar-street-light/>
- Qi, L., Zheng, P., Wu, X., Duan, W., Li, L., & Zhang, Z. (2020). A hybrid wind-photovoltaic power generation system based on the foldable umbrella mechanism for applications on highways. *Solar Energy*, 208(August), 368–378. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.082>
- Rathore, N., Panwar, N. L., Yettou, F., & Gama, A. (2021). A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications. *International Journal of Ambient Energy*, 42(10), 1200–1217. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1592774>
- Sah, B., & Kumar, P. (2023). Charger Integrated Coestimation of Parameters and States of Battery. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(7), 7923–7932. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3253562>
- Salas, A. T., & Jiménez, C. A. R. (2017). Estado del arte de aerogeneradores de eje horizontal y vertical. *Jóvenes En La Ciencia*, 3(2), 1966–1970. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/1778>
- Samaniego, C., & Icaza, D. (2017). *Análisis de la factibilidad de un sistema de generación híbrido eólico-fotovoltaico, para el mirador turístico La Tranca del cantón Chordeleg*. [Universidad Católica de Cuenca]. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/7952>
- Shan, H., Cao, H., Xu, X., Xiao, T., Hou, G., Cao, H., Tang, Y., & Zheng, G. (2022). Investigation of self-discharge properties and a new concept of open-circuit voltage drop rate in lithium-ion batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 26(1), 163–170. <https://doi.org/10.1007/s10008-021-05049-y>
- Shen, C., Xie, J., Zhang, M., Andrei, P., Hendrickson, M., Plichta, E. J., & Zheng, J. P. (2019). Self-Discharge Behavior of Lithium-Sulfur Batteries at Different Electrolyte/Sulfur Ratios. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(3), A5287–A5294. <https://doi.org/10.1149/2.0461903jes>
- Shin, H., & Roh, J. H. (2020). Framework for Sizing of Energy Storage System Supplementing Photovoltaic Generation in Consideration of Battery Degradation. *IEEE Access*, 8, 60246–60258. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977985>
- Sinuraya, A., Sinaga, D. H., Simamora, Y., & Wahyudi, R. (2022). Solar photovoltaic application for electric vehicle battery charging. *Journal of Physics: Conference Series*,

- 2193(1), 012075. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2193/1/012075>
- Srivastava, M. K. (2022). An Innovative Design of Hybrid System Using Wind Turbine and Photovoltaic Panel System. *SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology*, 14(02), 166–169. <https://doi.org/10.18090/samriddhi.v14i02.6>
- Stoev, P., & Matanov, N. (2022). Simulation Model of a Street Lighting System with LEDs. *2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/BulEF56479.2022.10021196>
- Sundaresan, S., Sunil, S., Balasingam, B., & Pattipati, K. R. (2022). Fast Offline Battery Capacity Estimation Approach With Performance Bounds. *2022 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 188–193. <https://doi.org/10.1109/EPEC56903.2022.10000219>
- Sutanto, B., Munawwaroh, D. A., Bono, B., Herlambang, Y. D., Sumarno, F. G., & Alfauzi, A. S. (2023). Analysis of Hybrid System in the Photovoltaic and Photothermal Technology. *Eksergi*, 19(01), 5. <https://doi.org/10.32497/eksergi.v19i01.4191>
- Sward, J. A., Siff, J., Gu, J., & Zhang, K. M. (2019). Strategic planning for utility-scale solar photovoltaic development – Historical peak events revisited. *Applied Energy*, 250, 1292–1301. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.178>
- Swiderski, M. (2019). Solar Power Plant with Distributed System of PV Panels. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 1(2), 57–60. <https://doi.org/10.15199/48.2019.02.11>
- Syafiqah, S. M. N., FaezahBintiAbdGhani, N., & Farhana, N. (2020). Battery monitoring for stand-alone photovoltaic system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1432(1), 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1432/1/012054>
- Tamoor, M., Bhatti, A. R., Butt, A. D., Miran, S., Kiren, T., Farhan, M., Raza, F., & ZakaUllah, P. (2022). Optimal Sizing of a Centralized Hybrid Photovoltaic System for Efficient Operation of Street Lights. *Journal of Engineering Research*. <https://doi.org/10.36909/jer.ICEPE.19563>
- Tan, Z., Wu, N., Zheng, Y., & Chen, W. (2022). Study on the influence of grid connected capacity difference of photovoltaic power generation on power grid performance. *Journal of Physics: Conference Series*, 2310(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2310/1/012003>
- Thar, H. A., Ya, A. Z., Win, Y. Y., Kyi Phyu, A. M., Myint, K. K., & Win Sein, M. T. (2020). Design and simulation of grid-connected photovoltaic-diesel hybrid system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 463(1), 012148.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012148>

- Thomitzek, M., von Drachenfels, N., Cerdas, F., Herrmann, C., & Thiede, S. (2019). Simulation-based assessment of the energy demand in battery cell manufacturing. *Procedia CIRP*, 80, 126–131. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.097>
- Torre, S., González-González, J. M., Aguado, J. A., & Martín, S. (2019). Optimal battery sizing considering degradation for renewable energy integration. *IET Renewable Power Generation*, 13(4), 572–577. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5489>
- Vinces, J. (2023). *radares*. Ecuavisa. <https://clicknoticias.com.ec/2023/08/28/cuenca-eliminarian-radares-de-fotomultas-por-velocidad/>
- Vistazo. (2024). Apagones en {Ecuador}: ¿{Cuándo} empiezan los cortes de luz en este 2024? In *www.vistazo.com*. <https://www.vistazo.com/actualidad/nacional/apagones-en-ecuador-cuando-empiezan-los-cortes-de-luz-en-este-2024-XH6559880>
- Wang, Z., Feng, G., Zhen, D., Gu, F., & Ball, A. (2021). A review on online state of charge and state of health estimation for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Energy Reports*, 7, 5141–5161. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.113>
- Weather Spark. (2021). El clima en verjel, el tiempo por mes, temperatura promedio - Weather Spark. In *Weather Spark*. <https://es.weatherspark.com/y/24280/Clima-promedio-en-Restrepo-Colombia-durante-todo-el-año%0Ahttps://es.weatherspark.com/y/22458/Clima-promedio-en-Venecia-Colombia-durante-todo-el-año%0Ahttps://es.weatherspark.com/y/19360/Clima-promedio-en-Guaranda-Ecuad>
- Weng, G.-M., Kong, J., Wang, H., Karpovich, C., Lipton, J., Antonio, F., Fishman, Z. S., Wang, H., Yuan, W., & Taylor, A. D. (2020). A highly efficient perovskite photovoltaic-aqueous Li/Na-ion battery system. *Energy Storage Materials*, 24, 557–564. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.06.032>
- WindCycle. (2024). *The Pros and Cons of Vertical Axis Wind Turbines - WindCycle*. <https://windcycle.energy/vertical-axis-wind-turbines-2/>
- Wu, H., Shan, S., & Zhou, Z. (2023). Performance analysis of a novel solar radiation cascade conversion system for combined heat and power generation based on spectrum splitting and reshaping. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 15(3). <https://doi.org/10.1063/5.0145302>
- Xiao, Y., Li, K., Huang, H., Tan, H., & Li, H. (2023). Energy Loss Analysis of Distributed Rooftop Photovoltaics in Industrial Parks. *Energy Engineering: Journal of the*

Association of Energy Engineering, 120(2), 511–527.

<https://doi.org/10.32604/ee.2023.022750>

Xue, X., Zheng, Y., & Duan, Y. (2023). Optimization Scheduling Method of Solar Photovoltaic and Fuel Cell Combined Power Generation System. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 42(1), 37–56. <https://doi.org/10.13052/spee1048-5236.4213>

Yadav, P., Davies, P. J., & Sarkodie, S. A. (2019). The prospects of decentralised solar energy home systems in rural communities: User experience, determinants, and impact of free solar power on the energy poverty cycle. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100424. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100424>

Yaylaci, E. K. (2021). A Solar Charger for Lead-Acid Batteries in an Autonomous PV System. *European Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1010771>

Zhang, X., Yuan, S., & Wang, Q. (2023). Causes and Prevention of Photovoltaic Module Hot Spot Effect. *Journal of Physics: Conference Series*, 2520(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2520/1/012012>

Zhang, Y. (2022). Application of Smart Lighting in Urban Street Lighting. *Journal of Electronic Research and Application*, 6(2), 32–37. <https://doi.org/10.26689/jera.v6i2.3858>

Zhou, H., Wu, H., Han, X., Zheng, Y., Yan, L., Lv, T., & Xie, J. (2022). An expeditious and simple scheme for measuring self-discharge rate of lithium batteries. *International Journal of Energy Research*, 46(11), 15948–15960. <https://doi.org/10.1002/er.8293>

Zhu, T., Lot, R., Wills, R. G. A., & Yan, X. (2020). Sizing a battery-supercapacitor energy storage system with battery degradation consideration for high-performance electric vehicles. *Energy*, 208, 118336. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118336>

Zilberman, I., Ludwig, S., & Jossen, A. (2019). Cell-to-cell variation of calendar aging and reversible self-discharge in 18650 nickel-rich, silicon–graphite lithium-ion cells. *Journal of Energy Storage*, 26, 100900. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100900>

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Christian Mauricio Peñafiel Morocho portador de la cédula de ciudadanía N.º 0104720776. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación "Diseño y simulación de un sistema híbrido eólico/fotovoltaico para alumbrado público en vías rápidas. Caso de estudio vía Cuenca – Azogues" de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 12 de agosto de 2024

F:

Christian Mauricio Peñafiel Morocho.

0104720776