

Estudio de factibilidad en la implementación de un sistema fotovoltaico off-grid que suministre electricidad e iluminación para “el bosque” en la Universidad Industrial de Santander.

Luis Alejandro Reatiga Mendoza y Kevin Andres Segovia Castellanos

Trabajo de Grado para optar el Título de Ingenieros Electricistas

Director

Rolando Andres Rincón Saravia

Ingeniero electricista, Magister en dirección de empresas MBA

Codirector

Gabriel Ordoñez Plata

Doctor en ingeniería industrial, área ingeniería eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas

Escuela de ingeniería Eléctricas, Electrónicas y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a nuestros padres, por su apoyo incondicional, sacrificio, amor y enseñanzas, que nos han forjado como personas resilientes y nos motivaron a superar los desafíos a lo largo de la carrera.

A nuestras familias, por brindarnos siempre su energía positiva y acompañarnos en nuestro crecimiento personal y profesional. Y a todas las personas cercanas que, con su conocimiento, afecto y palabras de aliento, contribuyeron a la consecución de esta meta.

A nuestro director Rolando Andrés Rincón Saravia, por su orientación, guía, conocimiento y paciencia durante el desarrollo de este proceso.

A nuestro codirector Gabriel Ordoñez Plata, por su dedicación y acompañamiento en la construcción de este proyecto.

Este trabajo de grado es el resultado del esfuerzo, la perseverancia y el compromiso colectivo de quienes creyeron en nosotros y apoyaron la culminación exitosa de este objetivo académico.

Luis Alejandro y Kevin Andres

Agradecimiento

A Dios, por ser mi guía constante, darme fortaleza en los momentos difíciles y permitirme llegar hasta aquí con fe y esperanza renovadas.

A mis padres, Alfonso e Isabel, quienes con esfuerzo, sacrificio y amor incondicional hicieron siempre todo lo necesario para permitirme avanzar en mi camino. Este logro es tan mío como de ustedes.

A mis hermanos, Sergio y Yuly, por ser pilares fundamentales en mi vida y en mi desarrollo personal, por acompañarme y motivarme a ser siempre mejor.

A mis mejores amigos, Daniel, Gabriela, Edson y Charlot, por ser piezas clave en este recorrido, por confiar en mí incluso cuando yo dudaba, y por estar presentes en cada etapa de este sueño.

A toda mi familia y allegados, quienes, con su apoyo, palabras de ánimo y fe en mis capacidades me recordaron que algún día lo lograría. Los llevo a todos en mi corazón con profundo agradecimiento.

Luis Alejandro

Agradecimiento

En primer lugar, agradezco a Dios por la vida, la salud y la oportunidad de haber convertido este objetivo en una meta cumplida y en un logro alcanzado.

A mis padres, por su amor incondicional por creer siempre en mí y apoyarme en cada momento de este camino profesional. A mi amor Carol, por motivarme, darme amor, brindarme compañía y darme apoyo incluso en los momentos más difíciles.

También mi gratitud a mis compañeros de clase, con quienes compartí experiencias y aprendizajes que ayudaron en mi formación, y a mis profesores, por su guía, enseñanzas y dedicación a lo largo de este proceso educativo.

Quiero dedicar estas palabras a la memoria de mis abuelos, Marina y Evaristo, quienes partieron durante mi carrera universitaria. Aunque ya no están físicamente presentes, su legado de alegría y amor siempre permanecen conmigo.

Gracias, abuelos, por enseñarme a nunca rendirme, por cada sonrisa, por cada palabra de aliento. Su amor y su fe en mí fueron el motor que me impulsó a alcanzar esta meta. Aunque ya no los pueda ver, sé que están orgullosos de mí, y sé que en sus corazones sabían que lo lograría.

Y finalmente, a mi mascota llamado Terry, que siempre estuvo acompañándome y trasnochándose conmigo en este proceso educativo.

Kevin Andres

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo general.....	13
1.2. Objetivos específicos	13
2. Hacer el levantamiento de información en “el bosque”.....	14
2.1. Ubicación del proyecto	14
2.2. Variables climáticas	15
2.3. Marco Normativo.....	16
2.4. Irradiación solar en “el bosque”	20
2.5. Estudio de sombras	22
2.6. Perfil del uso horario en electricidad e iluminación	25
2.7. Captación de radiación solar estimada para el sistema fotovoltaico off-grid	27
3. Desarrollar de tres propuestas de diseño del sistema solar fotovoltaico off-grid .	29
3.1. Creación del modelo para cada propuesta de diseño	29
3.1.1. Reubicación de los bancos de estudio e iluminación.....	30
3.1.2. Elaboración del modelo del diseño 1	31
3.1.3. Elaboración del modelo del diseño 2	32
3.1.4. Elaboración del modelo del diseño 3	33
3.2. Capacidad de almacenamiento de energía	35
3.3. Selección de equipos que conforman cada diseño del sistema fotovoltaico off-grid ...	36
3.4. Iluminación en DIALux de “el bosque”	39

3.5.	Simulación en PVSYST del rendimiento solar de cada Diseño	41
3.6.	Diagramas unifilares de cada Diseño.....	43
4.	Realizar el análisis financiero social y ambiental de la propuesta de diseño.....	44
4.1.	Análisis financiero	44
4.2.	Análisis social	45
4.3.	Análisis ambiental.....	46
4.4.	Tabla de decisión	46
5.	Conclusiones	47
6.	Recomendaciones	48
	Referencias Bibliográficas	49

Lista de Tablas

Tabla 1. Variables climáticas de los dos últimos años en la Universidad Industrial de Santander.	15
Tabla 2. Criterios guía para la escogencia de zonas estipuladas con clases de iluminación P, para otras zonas del espacio público.....	18
Tabla 3. Resultados de Irradiancia solar mínima en el bosque del programa Power NASA.....	21
Tabla 4. Datos diarios de la irradiación promedio en los últimos 10 años arrojados del programa PVGIS.....	22
Tabla 5. Equipos eléctricos que conforman el diseño 1.....	36
Tabla 6. Equipos eléctricos que conforman el diseño 2.....	37
Tabla 7. Equipos eléctricos que conforman el diseño 3.....	38
Tabla 8. Tabla de decisión para elección de diseño con mejores prestaciones.....	47

Lista de Figuras

Figura 1. Área de incidencia en la aplicación Google Maps, “el bosque”.	15
Figura 2. Interior de “el bosque”.	23
Figura 3. Vista superior del plano 2D de “el bosque” y las zonas de radiación solar.	25
Figura 4. Perfil de uso horario de iluminación.	26
Figura 5. Perfil de uso horario de electricidad.	27
Figura 6. Vista superior en plano 2D de la ubicación de los bancos de estudio y las zonas de radiación solar actualmente.....	29
Figura 7. Modelo del diseño 1 en SketchUp.....	32
Figura 8. Modelo del diseño 2 en SketchUp.....	33
Figura 9. Modelo del diseño 3 en SketchUp.....	34
Figura 10. Iluminación general de “el bosque” en la Universidad Industrial de Santander.	40
Figura 11. Iluminación del banco de estudio del diseño 1 de “el bosque” en la Universidad Industrial de Santander.	40

Resumen

Título: Estudio de factibilidad en la implementación de un sistema fotovoltaico off-grid que suministre electricidad e iluminación para “el bosque” en la Universidad Industrial de Santander*

Autores: Luis Alejandro Reatiga Mendoza, Kevin Andres Segovia Castellanos**

Palabras Claves: Sistema fotovoltaico off-grid, “el bosque”, radiación solar, sombras, iluminación, bancos de estudio, Diseños.

Descripción: El proyecto evalúa la factibilidad de implementar un sistema fotovoltaico off-grid en el sector “El Bosque” de la Universidad Industrial de Santander, con el fin de suministrar electricidad e iluminación mediante energía solar. El principal reto identificado es la densa cobertura arbórea, que genera sombras sobre los paneles y reduce la captación de radiación. Se identificaron las zonas con mayor radiación solar, lo que permitió reubicar los bancos de estudio y proponer tres diseños de sistemas off-grid. Las simulaciones en el software PVSYST mostraron una fracción solar del 100 % y pérdidas por sombreado inferiores al 3 %, garantizando independencia total de la red y un aprovechamiento eficiente del recurso solar.

Aunque técnica y ambientalmente viable, el alto costo de instalación limita su aplicación práctica. Por ello, se recomienda su implementación con fines académicos y de investigación en energías renovables.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Eléctricas, Electrónicas y de Telecomunicaciones. Director Rolando Andres Rincón Saravia. Codirector Gabriel Ordoñez Plata.

Abstract

Title: Feasibility Study for the Implementation of an Off-Grid Photovoltaic System to Provide Electricity and Lighting for "El Bosque" at the Industrial University of Santander*

Authors: Luis Alejandro Reatiga Mendoza, Kevin Andres Segovia Castellanos**

Keywords: Off-grid photovoltaic system, "el bosque," high solar radiation, shade, lighting, study benches, designs.

Description: This project evaluates the feasibility of implementing an off-grid photovoltaic system in the "El Bosque" sector of the Industrial University of Santander, with the aim of supplying electricity and lighting using solar energy. The main challenge identified is the dense tree cover, which casts shadows on the panels and reduces radiation capture. Areas with the highest solar radiation were identified, allowing for the relocation of the test benches and the proposal of three off-grid system designs. Simulations using PVSYST software showed a solar fraction of 100% and shading losses of less than 3%, guaranteeing complete grid independence and efficient use of solar resources.

Although technically and environmentally viable, the high installation cost limits its practical application. Therefore, its implementation is recommended for academic and renewable energy research purposes.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Eléctricas, Electrónicas y de Telecomunicaciones. Director Rolando Andres Rincón Saravia. Codirector Gabriel Ordoñez Plata.

Introducción

En las últimas décadas, la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles ha impulsado el desarrollo y la implementación de tecnologías renovables capaces de responder a las crecientes demandas de la sociedad moderna sin comprometer el medio ambiente ni agotar los recursos naturales. En este escenario, la energía solar se ha consolidado como una de las alternativas más prometedoras, gracias a su capacidad para generar electricidad de manera limpia, confiable y a partir de un recurso inagotable: la radiación solar.

Particularmente, los sistemas fotovoltaicos han adquirido gran relevancia por su versatilidad y adaptabilidad, permitiendo reducir la dependencia de los combustibles fósiles y contribuir a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero. En un contexto global en el que mitigar el impacto ambiental de las actividades humanas se ha convertido en una prioridad, las energías renovables representan un cambio paradigmático hacia modelos energéticos sostenibles. Este enfoque no solo busca suplir la demanda energética, sino hacerlo de manera respetuosa con los ecosistemas, evitando intervenciones invasivas.

En espacios naturales como parques y áreas boscosas, los sistemas fotovoltaicos ofrecen una solución eficiente para cubrir necesidades energéticas, al tiempo que favorecen la preservación ambiental. En este marco, el presente proyecto tiene como propósito analizar la viabilidad técnica, económica, social y ambiental de implementar un sistema fotovoltaico off-grid en el sector denominado “el bosque” de la Universidad Industrial de Santander. La iniciativa busca garantizar el suministro de electricidad y la iluminación en este espacio, fomentando actividades académicas, recreativas y de esparcimiento, con un impacto positivo en la comunidad universitaria y en sus visitantes.

El estudio contempla un análisis detallado del consumo eléctrico del área, la identificación de los puntos de radiación solar, el diseño de diagramas unifilares representativos del sistema, así como simulaciones de iluminación en DIALux y de desempeño energético en PVSYST. Igualmente, se realizará la selección de equipos paneles solares, baterías, inversores y controladores en función del dimensionamiento adecuado y en el cumplimiento de la normativa vigente, que abarca la NTC 2050, el RETIE y el RETILAP, lo que garantiza criterios de seguridad, eficiencia y confiabilidad.

Para la caracterización del recurso solar se emplean bases de datos como Power NASA y PVGIS, mientras que el análisis de sombras se desarrollará en el sitio mediante el dispositivo Solar Pathfinder. Estas herramientas, complementadas con las simulaciones en DIALux software especializado, permitirán visualizar la iluminación nocturna del sector y la iluminación del banco de estudio. Finalmente, el proyecto propone diferentes alternativas de diseño integral de un sistema fotovoltaico off-grid, con el fin de ofrecer propuestas de distribución e iluminación que garanticen eficiencia, sostenibilidad y un aprovechamiento óptimo de los recursos disponibles.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

- Evaluar la factibilidad en la implementación de un sistema fotovoltaico off-grid que suministre electricidad e iluminación para “el bosque” en la Universidad Industrial de Santander.

1.2. Objetivos específicos

- Hacer el levantamiento detallado de información sobre el sector “el bosque” en la Universidad Industrial de Santander, enfocado en las condiciones ambientales, de infraestructura y de energía para el diseño de sistemas solares.
- Desarrollar tres propuestas de diseño de sistemas solares fotovoltaicos para el sector “el bosque”, considerando la optimización de generación, almacenamiento y distribución de energía en el área.
- Realizar un análisis de costos y seleccionar la propuesta de diseño fotovoltaico que optimice la inversión, considerando tanto la relación costo-beneficio como los beneficios ambientales y sociales.

2. Hacer el levantamiento de información en “el bosque”

Se llevó a cabo un levantamiento de información en el sector denominado “el bosque”, con el fin de identificar sus características principales y recopilar datos relevantes para el desarrollo del proyecto. Este proceso incluyó la evaluación del comportamiento de la radiación solar en el área, así como otros factores ambientales y técnicos que influyen en la implementación del sistema. La información obtenida servirá como base para el diseño y la planificación inicial, garantizando que las decisiones posteriores estén fundamentadas en un diagnóstico preciso del sector de la universidad.

2.1. Ubicación del proyecto

Para el desarrollo del proyecto del sistema solar fotovoltaico off-grid, primero que todo, se ubicó en este lugar con coordenadas geográficas (7.1422, -73.1214) lo que corresponde a Bucaramanga, Santander, más específicamente, en la Universidad Industrial de Santander, detrás de la E3T (Escuela de ingeniería Eléctrica, electrónica y Telecomunicaciones) e ingeniería industrial (**Figura 1**).

Este espacio cuenta con un área aproximada total de 8.632 m², en la cual se observa un ecosistema natural que está formado por árboles, arbustos, plantas, animales, hongos y microorganismos. Asimismo, cuenta con unas mesas de estudio ubicadas a la intemperie, en total son 15 bancos de estudio, las cuales, hoy en día, se encuentran dispersas entre toda esta área.

Figura 1

Área de incidencia en la aplicación Google Maps, “el bosque”.



2.2. Variables climáticas

Las variables climáticas correspondientes en Bucaramanga, Santander en la Universidad Industrial de Santander son de clima tropical templado (**Tabla 1**). En esta zona, las temperaturas oscilan normalmente entre los 15° grados hasta los 30° grados con una velocidad del viento de 4 m/s que garantiza muchos días soleados y sin estaciones por la cual podemos aprovechar este recurso solar durante todo el año. Estas variables fueron tomadas en la base de datos de Power NASA correspondientes a los años 2023 y 2024, ya que estos representan un rango temporal reciente y cercano a las condiciones esperadas de “el bosque”.

Tabla 1

Variables climáticas de los dos últimos años en la Universidad Industrial de Santander.

Variables Climáticas 23-24	Promedio Anual 2023-2024
Precipitación 23-24	3.9 mm/day
Humedad Relativa 23-24	76.3 %
Temp Max 23-24	29.1 °C
Temp Min 23-24	14.1 °C
Velocidad Viento 23-24	3.26 m/s

2.3. Marco Normativo

A continuación, se presentan las normativas que se utilizaron durante el desarrollo de este proyecto.

- **Norma Técnica Colombiana 2050 (NTC)**

El Capítulo 6 de la Norma Técnica Colombiana (NTC 2050), titulado "Equipos especiales", en su Sección 690, denominada "Sistemas solares fotovoltaicos", establece los requisitos para la instalación segura de sistemas fotovoltaicos. Esta sección aborda aspectos clave como las generalidades, los requisitos para los circuitos, los medios de desconexión, los métodos de alambrado, la puesta a tierra, el rotulado, la conexión a otras fuentes de energía y el uso de baterías o acumuladores. La aplicación de estos requisitos técnicos es fundamental para asegurar el cumplimiento de los estándares de seguridad, la correcta instalación y los criterios de diseño en la implementación del sistema solar fotovoltaico de este proyecto.

- **Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)**

En el Libro 2 del RETIE, titulado "Productos objeto del RETIE", el Título 3, denominado "Requisitos específicos para los productos utilizados en las instalaciones eléctricas", establece las condiciones técnicas y los ensayos mínimos que deben cumplir los componentes de un sistema solar fotovoltaico, tales como baterías, inversores, paneles solares y controladores de carga. Cada uno de estos componentes debe cumplir con los requisitos y pruebas técnicas definidas en la normativa para garantizar su correcto funcionamiento y seguridad.

Además, en el Libro 3 del RETIE, titulado "Instalaciones objeto del RETIE", el Capítulo 1, denominado "Requerimientos generales de las instalaciones eléctricas", y el Título 17, titulado "Requisitos de instalación de los principales productos utilizados en instalaciones eléctricas", se definen los lineamientos específicos para la instalación segura y eficiente de sistemas fotovoltaicos. Estos lineamientos aplican a los paneles solares, baterías de almacenamiento, inversores y controladores de carga, los cuales deben cumplir con las disposiciones técnicas y de seguridad establecidas por la normativa.

- **Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP)**

El Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP), en el Libro 2, titulado "Productos objeto del RETILAP", en el Título 6, "Productos de iluminación para alumbrado público", en los Artículos 2.6.1 y 2.6.2, establece los requisitos generales y los ensayos mínimos que deben cumplir las luminarias que incorporan dispositivos de generación fotovoltaica. Estos lineamientos son esenciales para garantizar la calidad y seguridad de los equipos de iluminación utilizados en el proyecto.

En el Libro 3 del RETILAP, titulado "Instalaciones de sistemas de iluminación", en el Título 3, "Instalaciones de proyectos de alumbrado público", el Artículo 3.3.1 establece los "Criterios generales de diseño de alumbrado público". En el Apartado 3.3.1.5, titulado "Requisitos de iluminación en otras áreas del espacio público", se definen los niveles mínimos de iluminación y su clasificación según las clases de alumbrado tipo P (Tabla 2). Además, el Apartado 3.3.1.5.1, denominado "Parques", establece los parámetros específicos de iluminación para parques urbanos y parques en reservas naturales.

Tabla 2

Criterios guía para la escogencia de zonas estipuladas con clases de iluminación P, para otras zonas del espacio público.

Clase de Iluminación	Tipo de aplicación
P1	Zonas Peatonales adyacentes a vías principales con clase de iluminación M1 y M2
P2	Zonas peatonales adyacentes a vías con clase de iluminación M3, senderos peatonales no adyacentes a vías y con alto índice de circulación de personas, paseos peatonales comerciales abiertos, zonas peatonales alrededor de zonas de parqueo abiertos y zonas de parqueo en zonas de reserva forestal
P3	Senderos peatonales con alta afluencia de personas adyacentes o dentro de parques recreativos, polideportivos o similares, senderos peatonales no adyacentes a vías vehiculares
P4	Zonas peatonales adyacentes a vías con clase de iluminación M4 y M5
P5	Zonas peatonales adyacentes a vías con clase de iluminación M6
P6	Zonas verdes dentro de parques urbanos o iluminación de zonas peatonales de reservas naturales, senderos rurales, complejos de protección ecológicos y de protección de fauna silvestre o zonas dentro de estos complejos, donde se autorice implementar iluminación de seguridad

Para las zonas de edificios educativos o áreas dedicadas a actividades académicas, el Libro 3 del RETILAP, en el Título 2, titulado "Instalaciones de sistemas de iluminación interior", en el Artículo 3.2.2, establece los "Requisitos de iluminación interior". Estos requisitos incluyen los niveles mínimos de iluminancia, uniformidad, UGR y CRI, además de especificaciones para áreas de tarea visual, como oficinas, instituciones educativas, salas de lectura y auditorios. En la Tabla 3.2.2.6.a se presentan observaciones específicas para diferentes tipos de espacios.

- **Manual de Evaluación de Estudios Ambientales**

Es fundamental considerar el Manual de Evaluación de Estudios Ambientales, que aborda aspectos clave como el diagnóstico ambiental de alternativas, la elaboración de estudios de impacto ambiental, los planes de manejo ambiental y la caracterización de las condiciones del terreno y la cobertura vegetal. Este marco normativo orienta la identificación, prevención y mitigación de los posibles impactos derivados de la instalación del sistema.

- **Decreto 1076 de 2015 – Normativa Ambiental**

El Decreto 1076 de 2015, que compila la normativa ambiental vigente en Colombia, establece disposiciones aplicables a proyectos con potencial impacto sobre los recursos naturales. En particular, el Capítulo 1, titulado "Flora", regula en sus Secciones 5 y 8 el aprovechamiento de recursos forestales, un aspecto clave para la planificación de un sistema de iluminación fotovoltaico en un área natural dentro de la Universidad Industrial de Santander.

- **Norma Técnica Colombiana NTC 4552-1**

Finalmente, la norma de protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos) parte 1: principios generales en la sección 8. Llamado “criterios básicos para la protección de estructuras y acometidas” en el apartado 8.3 llamado “protección de estructuras” donde nos habla de la protección para reducir daños físicos, riesgos de perder la vida y reducir fallas en sistemas internos, importante para proteger los diseños fotovoltaicos off-grid ante descargas atmosféricas.

2.4. Irradiación solar en “el bosque”

En la base de datos de Power NASA se encuentran los datos de irradiancia solar mínima e irradiancia solar mínima en un ángulo óptimo correspondientes a los últimos 10 años. Para garantizar la disponibilidad energética, se adoptó por el caso estricto con el fin de garantizar una alta disponibilidad de energía. Se realizó una comparación y se determinó que lo más conveniente sería trabajar con la irradiancia mínima solar en el ángulo óptimo para aprovechar al máximo la radiación solar mes a mes y así identificar el "peor mes", como se muestra en la (**Tabla 3**).

Tabla 3

Resultados de Irradiancia solar mínima en el bosque del programa Power NASA.

PARAMETROS	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
IRRADIANCIA SOLAR MÍNIMA [KWh/m ² /día]	4,16	4,29	3,56	3,54	3,58	3,67	3,87	4,00	3,90	3,74	3,49	3,62
IRRADIANCIA SOLAR MÍNIMA INCLINACIÓN LATITUD [KWh/m ² /día]	4,43	4,49	3,64	3,58	3,59	3,66	3,87	4,04	3,98	3,86	3,65	3,89
IRRADIANCIA SOLAR MÍNIMA LATITUD INCLINACIÓN MENOS DE 15° [KWh/m ² /día]	3,84	4,03	3,45	3,46	3,53	3,64	3,82	3,92	3,78	3,57	3,28	3,31
IRRADIANCIA SOLAR MÍNIMA LATITUD INCLINACIÓN MÁS DE 15° [KWh/m ² /día]	4,80	4,74	3,68	3,55	3,50	3,54	3,75	3,98	4,01	3,99	3,87	4,28
IRRADIANCIA SOLAR MÍNIMA ÓPTIMA [KWh/m ² /día]	4,93	4,78	3,69	3,58	3,59	3,67	3,87	4,04	4,02	4,00	3,91	4,47
ÁNGULO ÓPTIMO IRRADIANCIA SOLAR MÍNIMA [°]	37,50	31,00	19,00	11,50	5,00	2,50	3,50	9,50	17,00	25,50	33,00	37,50
ORIENTACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR MÍNIMA [N/S Orientación]	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
IRRADIANCIA SOLAR MÍNIMA SUPERFICIE INCLINADA [KWh/m ² /día]	3,53	3,14	2,19	2,00	1,97	2,01	2,10	2,20	2,57	2,55	3,40	3,40

De acuerdo con estos datos, el mes con la menor irradiancia corresponde a abril, con un valor de 3.58 kW*hr/m²/día.

Para complementar la información y asegurar una comparación más precisa, se investigaron los datos de irradiación en la base de datos de PVGIS, utilizando las referencias de los últimos 10 años y considerando el ángulo óptimo (**Tabla 4**).

Tabla 4

Datos diarios de la irradiación promedio en los últimos 10 años arrojados del programa PVGIS.

Irradiancia Global Diaria Promedio Últimos 10 Años [KWh/m ² /día]											
ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
5,48	5,6	5,13	4,6	4,06	3,94	4,16	4,6	4,88	4,66	4,66	5,29

Para complementar la información y asegurar una comparación más precisa, se investigaron los datos de irradiación en la base de datos de PVGIS, utilizando las referencias de los últimos 10 años y considerando el ángulo óptimo. Según esta base de datos, el peor mes con la menor irradiación es junio, con un valor de 3.94 kWh/m²/día. A pesar de las diferencias en los datos proporcionados por ambas bases de datos, se seleccionó el valor mínimo de irradiación solar con el ángulo óptimo del peor mes, que en este caso corresponde a la base de datos de Power NASA con 3.58 kWh/m²/día.

Además, se llevó a cabo el proceso para determinar los ángulos de inclinación y acimut, (los cuales se encuentra en los ANEXOS, MEMORIAS DE CALCULO).

2.5. Estudio de sombras

Durante la visita en "El Bosque" se observó una gran cantidad de árboles, aproximadamente de 13 metros de altura, lo que dificulta parcialmente el proceso de captación de energía lumínica proveniente del sol (**Figura 2**). Además, se encontraron dos grandes estructuras, correspondientes a la Escuela de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Industrial, que tienen una altura

similar, alrededor de 20 metros. Estas edificaciones pueden generar sombras, lo que podría influir en el rendimiento del sistema fotovoltaico off-grid.

Figura 2

Interior de "el bosque".



Por otro lado, el ángulo cenital (el ángulo formado entre los rayos del sol y la vertical de un lugar en la Tierra) en Bucaramanga es relativamente pequeño debido a nuestra proximidad a la línea del ecuador. Esto significa que la posición del sol respecto a la vertical no varía considerablemente a lo largo del año, lo que reduce el impacto de las edificaciones en la proyección de sombras.

Para el análisis del sombreado presentado en "El Bosque" de la Universidad Industrial de Santander, se utilizó el Solar PathFinder, una herramienta especializada en estudios solares. Este equipo se ubicó en los puntos o zonas donde llegaba directamente la radiación solar y junto a una plantilla que muestra la trayectoria solar promedio para cada mes y hora a hora durante el día, nos permitió identificar en su espejo de vidrio las sombras generadas por los árboles. Se observó que,

en general, las sombras de los árboles presentan pocas variaciones significativas durante el día y durante el año.

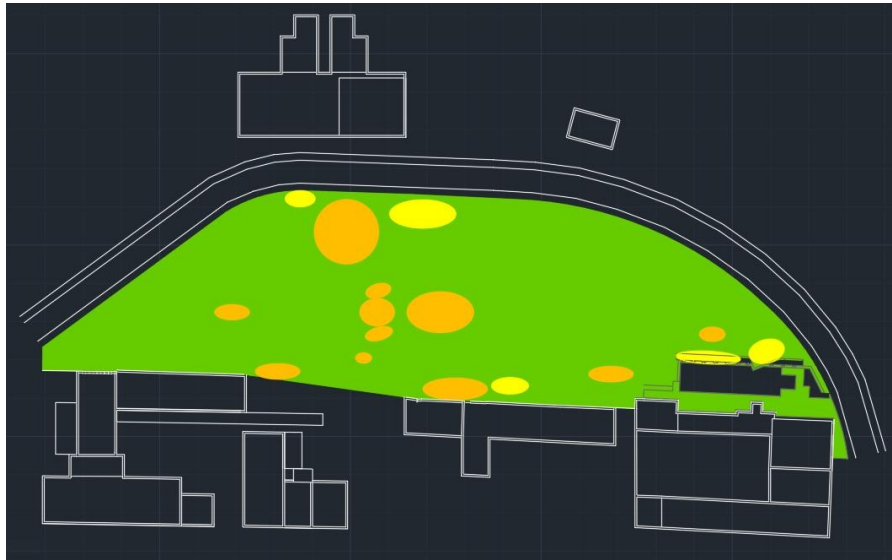
Asimismo, la razón por la que varían es por el movimiento del sol conforme avanza el día, lo que dificulta la identificación de zonas fijas de exposición solar. El Solar PathFinder estimó que las zonas de exposición solar permanecen fijas por alrededor de 4 horas, antes de que las sombras generadas por los árboles comiencen a afectar o alterar dichas zonas de radiación solar.

Esta herramienta de sombreado se utilizó durante días despejados, abarcando tanto las horas de la mañana como de la tarde. Esto permitió obtener un estudio detallado de la dinámica de sombras en "El Bosque" y establecer una estimación de la ubicación óptima para los bancos de estudio y su iluminación.

Para una mejor visualización en un plano 2D de "El Bosque" y para una representación más precisa de los puntos de mayor radiación solar desde una vista superior, se utilizó el software AutoCAD (**Figura 3**). Este software fue la herramienta inicial para los planos de "El Bosque" debido a su accesibilidad como estudiante universitario y la facilidad de exportar los documentos a programas como DIALux para el diseño de la iluminación.

Figura 3

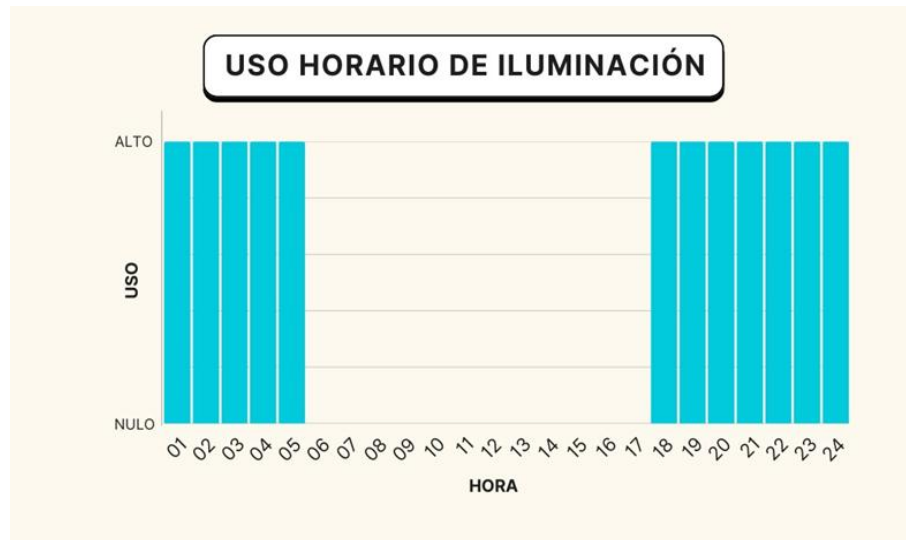
Vista superior del plano 2D de “el bosque” y las zonas de radiación solar.

**2.6. Perfil del uso horario en electricidad e iluminación**

El área de incidencia denominada "El Bosque" se encuentra dentro del campus de la Universidad Industrial de Santander, lo que establece un patrón de uso particular para la iluminación y el consumo de electricidad. La iluminación será necesaria únicamente durante el horario nocturno, a partir de las 6:00 p.m., debido a la densa cobertura arbórea que reduce considerablemente la visibilidad y dificulta el tránsito. Durante el día, no se requiere iluminación (Figura 4).

Figura 4

Perfil de uso horario de iluminación.



Por otro lado, el uso de electricidad es constante a lo largo del día, pero con una mayor demanda durante el horario diurno, debido a la mayor afluencia de estudiantes por las jornadas académicas. En este período, se anticipa un incremento en el consumo energético debido a la carga de dispositivos como portátiles y celulares. En contraste, durante la noche, la demanda de electricidad disminuirá, ya que la presencia de estudiantes en el campus será considerablemente reducida o incluso nula (**Figura 5**).

Figura 5

Perfil de uso horario de electricidad.

**2.7. Captación de radiación solar estimada para el sistema fotovoltaico off-grid**

Al definir los puntos de captación de radiación solar durante el día, se consideraron dos criterios con el objetivo de minimizar cualquier posible sombreado. El primer criterio se basó en el estudio de sombras mencionado anteriormente, a partir del cual se seleccionaron los puntos donde se evidenciaba una radiación solar en esta área.

Como segundo criterio, se tomó en cuenta la longitud de sombra (el procedimiento se encuentra en ANEXOS, MEMORIAS DE CALCULO), que se refiere a la distancia mínima que deben mantener los paneles solares respecto a los árboles y vegetación circundante, ya que estos influyen en el paso de la energía solar. Esto con el fin de minimizar el sombreado y asegurar que

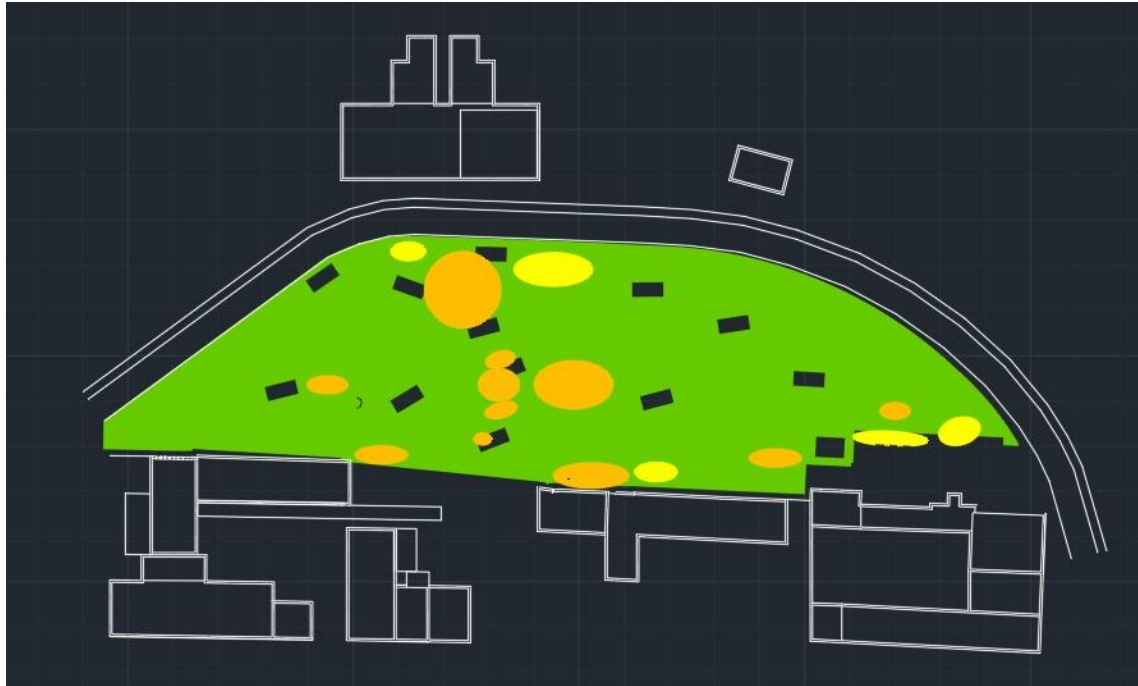
los puntos seleccionados para la instalación de los paneles solares reciban una mejor exposición. Este concepto se refiere a la ubicación óptima de los bancos de estudio e iluminación, y se toma del libro Todo lo que necesitas saber sobre la energía fotovoltaica (versión 3, Academia de Energía Solar).

El cumplimiento de este criterio incluye la posibilidad de realizar una tala responsable de los árboles, siguiendo lo establecido en el Manual de Evaluación de Estudios Ambientales. Además, se debe tener en cuenta el Decreto 1076 de 2015, que regula la gestión ambiental de los proyectos que puedan generar impactos en los recursos naturales.

Una vez definidas las zonas de mayor radiación solar en "El Bosque", se procedió a ubicar los bancos de estudio (**Figura 6**), con la idea de obtener una perspectiva clara de cómo se visualiza actualmente el área.

Figura 6

Vista superior en plano 2D de la ubicación de los bancos de estudio y las zonas de radiación solar actualmente.



Por lo tanto, la ubicación de las zonas de radiación solar no coincide con la de los bancos de estudio, lo que requiere una reubicación de estos últimos para optimizar la captación solar. Este ajuste permitirá mejorar la eficiencia energética de los bancos de estudio y garantizar que el centro de estudios siga siendo un espacio adecuado para la comunidad universitaria.

3. Desarrollar de tres propuestas de diseño del sistema solar fotovoltaico off-grid

3.1. Creación del modelo para cada propuesta de diseño

Se diseñaron tres opciones con diferentes estilos y características, con el objetivo de modernizar y mejorar la visualización de “el bosque” utilizando un software llamado SketchUp, cuya principal función es crear modelos 3D precisos que permiten representar de manera realista

estructuras, equipos e instalaciones en un entorno virtual. Estos diseños buscan hacer que el área sea más atractiva para la comunidad universitaria, incentivando su presencia y uso dentro del campus.

Cada diseño se piensa teniendo en cuenta la seguridad y protección de los equipos frente a descargas atmosféricas. Siguiendo lo establecido en la norma NTC 4552-1, que regula los principios generales sobre rayos, y utilizando una plantilla específica para registrar los datos necesarios para el cálculo de apantallamiento, se determinó que los bancos de estudio no requieren protección externa. Esto se debe a que las estructuras más altas cercanas, como el Edificio E3T, el Edificio de Ingeniería Industrial y los árboles próximos, actúan como elementos de apantallamiento, protegiendo adecuadamente los equipos. (el informe detallado de la evaluación de riesgo para protección contra rayos se encuentra en los ANEXOS, APANTALLAMIENTO ELECTRICO).

3.1.1. Reubicación de los bancos de estudio e iluminación

Antes de la creación de los modelos, se realizó la reubicación de los 15 bancos de estudio y los postes de iluminación general (Los planos se encuentran en los ANEXOS, AUTOCAD, PLANOS). Para ello, se reubicaron de manera que quedaran situados en las zonas donde llega la radiación solar, con el objetivo de aprovechar al máximo la captación solar y permitir la instalación de un sistema fotovoltaico off-grid. Esta disposición aplica tanto para el primer como para el segundo diseño.

En cuanto al tercer diseño, no es necesario que los bancos de estudio estén directamente alineados con las zonas de radiación solar, ya que la fuente de generación de energía, los paneles solares, estará ubicada fuera de "el bosque".

Asimismo, en las zonas donde no haya radiación solar, no se colocarán ni bancos de estudio ni luminarias ni ninguna otra construcción, con el fin de preservar y proteger la vegetación y arborización del entorno natural y universitario.

3.1.2. Elaboración del modelo del diseño 1

Para el Diseño 1, se propuso la instalación de un solo banco de estudio, acompañado de postes de iluminación que estarán distribuidos por "el bosque", con cada uno de ellos equipado con su propio sistema fotovoltaico off-grid independiente (**Figura 7**) (el modelo se puede observar en los ANEXOS, SKETCHUP, Fotos de los Diseños, Diseño 1). El banco de estudio constará de dos mesas, tres bancas y su respectivo tablero, configurando un sistema fotovoltaico autónomo. La fuente de generación del sistema estará ubicada en la parte superior de la estructura (techo), donde se instalarán dos paneles solares para captar la radiación solar disponible en el área y a su vez 6 luminación de 30 vatios cada una suficiente para iluminar tanto la mesa como el tablero de estudio.

La estructura del banco de estudio tendrá una altura de 2,39 metros y adoptará una forma de "H". Internamente, se integrará un tablero con las siguientes dimensiones: 0,99 m de altura, 1,20 m de largo y 0,06 m de ancho. Además, se instalará un gabinete de aproximadamente 0,2 m de altura, 0,44 m de ancho y 1,20 m de largo, donde se alojarán los componentes principales del sistema: un banco con dos baterías, el controlador de carga y el inversor. Este conjunto permitirá alimentar dispositivos como cargadores de celular, computadoras portátiles y la iluminación asociada al sistema fotovoltaico independiente.

En cuanto a los postes de la iluminación general, estarán compuestos por 28 postes metálicos de aproximadamente 7 metros de altura.

Figura 7

Modelo del diseño 1 en SketchUp.

**3.1.3. Elaboración del modelo del diseño 2**

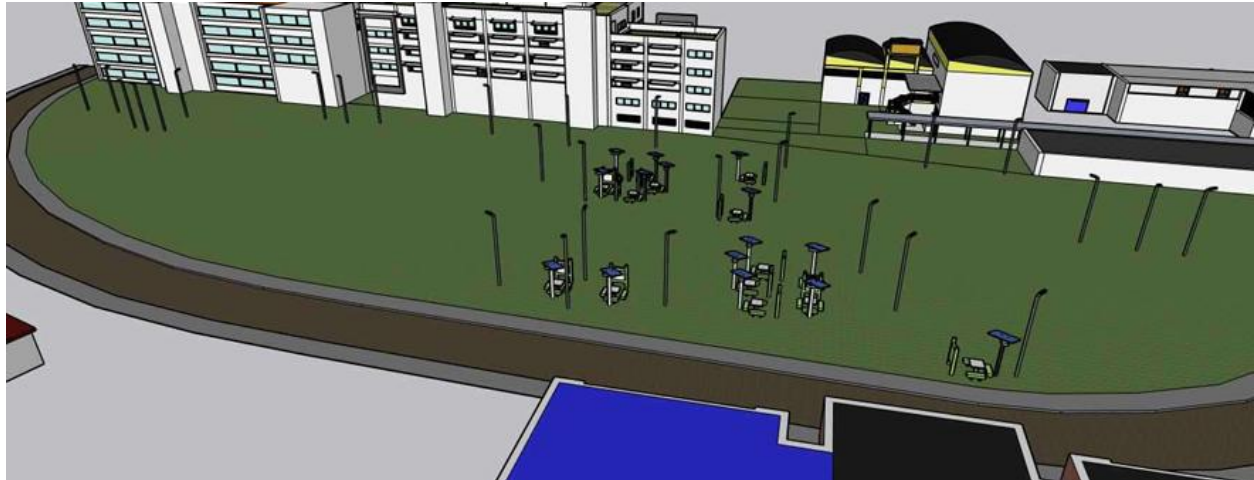
En el Diseño 2, se propone un único banco de estudio acompañado de postes para la iluminación general de "El Bosque", cada uno con su propio sistema fotovoltaico off-grid independiente (**Figura 8**) (el modelo se puede observar en los ANEXOS, SKETCHUP, Fotos de los Diseños, Diseño 2). El diseño de los bancos de estudio incluye una mesa, tres bancas y una estructura que alberga internamente el tablero. La captación solar y el sistema de iluminación del banco de estudio se ubican en un poste individual de 3 metros de altura, el cual contará con la potencia suficiente para iluminar tanto la mesa como el tablero de estudio.

Cada poste incluirá un gabinete que albergará un banco con dos baterías, el controlador de carga y el inversor, con dimensiones similares a las del Diseño 1. El sistema fotovoltaico será compacto, diseñado para alimentar las cargas eléctricas comunes en las zonas universitarias, como cargadores de celular, computadoras portátiles, con el objetivo de minimizar el uso de materiales y facilitar su instalación.

En cuanto a la iluminación general de "El Bosque", se instalarán 28 postes metálicos de aproximadamente 7 metros de altura. Este enfoque busca garantizar un sistema fotovoltaico sencillo, eficiente y autónomo, con un diseño optimizado en términos de espacio y economía.

Figura 8

Modelo del diseño 2 en SketchUp.



3.1.4. Elaboración del modelo del diseño 3

En el Diseño 3, se propone una fuente de generación fotovoltaica ubicada en el exterior de "El Bosque", cerca de la zona de tránsito de vehículos o en las cercanías del edificio de Laboratorio y Materiales de Ingeniería Civil. Además, se incluirá otro sistema fotovoltaico off-grid para la iluminación general de "El Bosque", con 28 postes metálicos de 7 metros de altura (**Figura 9**) (el modelo del diseño se puede observar en los ANEXOS, SKETCHUP, Fotos de los Diseños, Diseño 3). Esta fuente de generación solar exterior proporcionará alimentación a todos los bancos de estudio de "El Bosque".

El diseño contempla 12 estructuras, cada una equipada con tres paneles solares en el techo. Los gabinetes estarán distribuidos en 4 de estas 12 estructuras. El banco de estudio estará alimentado por la energía solar generada, lo que permitirá abastecer las cargas eléctricas típicas

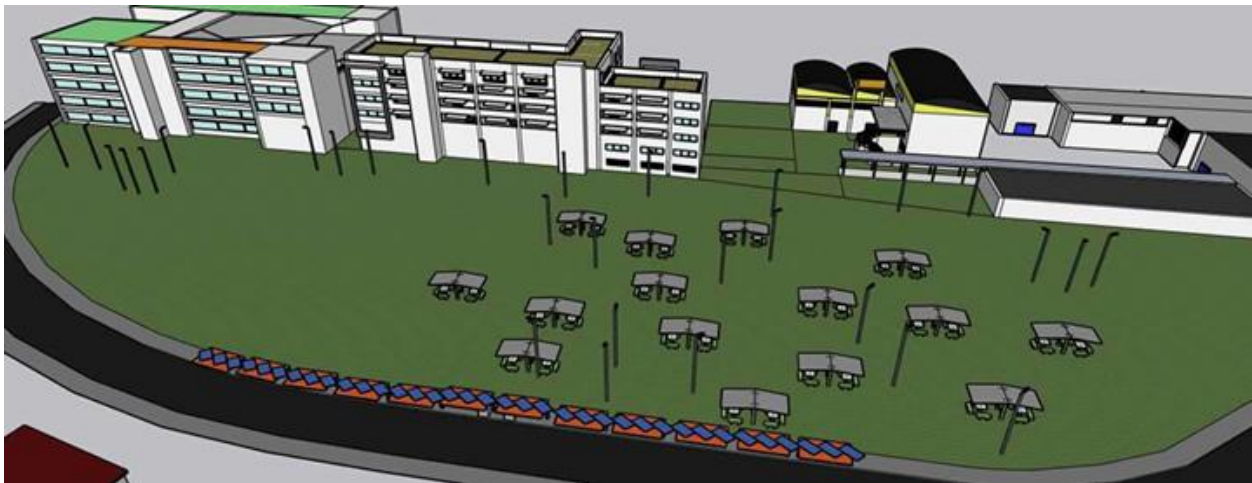
del campus universitario, incluida la iluminación de las mesas y tableros de estudio. Estos bancos se distribuirán de manera uniforme en un sector cercano a la fuente de generación solar para optimizar la regulación de la tensión en el transporte de energía eléctrica.

El sistema incluirá dos gabinetes con 14 baterías, un inversor y un controlador de carga en cada uno, y otros dos gabinetes con únicamente un controlador de carga. La propuesta contempla un sistema robusto y de mayor capacidad, compuesto por 36 paneles solares distribuidos en 9 subgrupos de 4 paneles cada uno. Cada subgrupo estará conectado a un controlador de carga, y dos de esos controladores alimentarán un banco de 14 baterías, mientras que los otros dos controladores alimentarán un segundo banco de 14 baterías.

Finalmente, cada banco de baterías estará vinculado a su respectivo inversor. Los inversores serán independientes, uno de los cuales alimentará 7 bancos de estudio y el otro, 8 bancos de estudio. Este diseño asegura un suministro de energía eléctrica más eficiente, facilita el mantenimiento y garantiza que, en caso de fallos, el suministro no se interrumpa por completo.

Figura 9

Modelo del diseño 3 en SketchUp.



3.2. Capacidad de almacenamiento de energía

Utilizamos la metodología de cálculo de la capacidad de almacenamiento de energía en Amperios Hora (AH) para dimensionar los bancos de baterías de nuestros sistemas fotovoltaicos aislados. Este es el método más utilizado y reconocido, ya que tiene en cuenta el rendimiento o eficiencia total del sistema fotovoltaico (SFV), los días de autonomía, la profundidad de descarga de la batería y su tensión (el desarrollo detallado en cada diseño se encuentra en los ANEXOS, MEMORIAS DE CALCULO).

Para el Diseño 1, se trabajará con una tensión de 25.6 VDC en el banco de baterías y un consumo diario de 2253 Wh/día, con 3 días de autonomía, dado que es una instalación no prioritaria y se encuentra en una zona universitaria. Se utilizará una batería de litio con una profundidad de descarga del 80%, un porcentaje común en las baterías de esta tecnología en el mercado colombiano.

Para el Diseño 2, siendo una instalación básica y sencilla, se asignará una autonomía de 2 días. Se utilizará tecnología de baterías de litio con una profundidad de descarga del 80% y una tensión de 12.8 VDC, ya que el consumo para este diseño será de 1157 Wh/día.

Para el Diseño 3, al ser una instalación no prioritaria, compleja y robusta, se asignará una autonomía de 3 días, que es el criterio mínimo. Se empleará tecnología de baterías de litio con una profundidad de descarga máxima del 80%, utilizando una tensión de 51.2 VDC en el banco de baterías. Esto se debe al gran tamaño del sistema fotovoltaico, que tiene un consumo de 35526 Wh/día.

3.3. Selección de equipos que conforman cada diseño del sistema fotovoltaico off-grid

La selección de los equipos que conforman cada diseño del sistema fotovoltaico off-grid es una etapa fundamental para garantizar el correcto funcionamiento, la autonomía energética y la vida útil del sistema. Además, la selección se realiza relacionando los cálculos eléctricos con los equipos solares disponibles en el mercado colombiano, garantizando un dimensionamiento adecuado. (el dimensionamiento detallado de cada diseño se encuentra en los ANEXOS, MEMORIAS DE CALCULO).

Tabla 5

Equipos eléctricos que conforman el diseño 1.

Componente	Descripción / Especificaciones Técnicas
Panel solar	Marca: Restarsolar Modelo: 550 W Monoperc Voc: 49.90 V Vmp: 41.96 V Isc: 14 A Imp: 13.11 A Eficiencia: 21.28%
Banco de baterías	Marca: Epever Modelo: LFP5.12KWH25.6V-P65L2GF40 Tecnología: Litio Capacidad: 200 Ah
Controlador solar	Marca: Epever Modelo: Tracer 5415AN
Inversor	Marca: Epever Modelo: Pure Sine Wave Inverter PLUS Potencia: 1000 W Tipo: Onda pura
Conductores	Calibre 6 AWG – Marca: Hebei Huatong Wires & Cables Calibre 14 AWG – Marca: Centelsa Nexans
Protecciones eléctricas	Portafusibles, fusibles DC, DPS DC, breaker DC, interruptor GFCI, DPS AC
Puesta a tierra	Todos los equipos y estructuras metálicas conectados a tierra mediante conductor correspondiente

Tabla 6*Equipos eléctricos que conforman el diseño 2.*

Componente	Descripción / Especificaciones Técnicas
Panel solar	Marca: Longi Modelo: 605 W Monoperc Voc: 52.27 V Vmp: 44.03 V Isc: 14.74 A Imp: 13.75 A Eficiencia: 22.4%
Banco de baterías	Marca: Epever Modelo: LFP1.92KWH12.8V-P65L2 Tecnología: Litio Capacidad: 150 Ah
Controlador solar	Marca: Epever Modelo: Tracer 5415AN
Inversor	Marca: Epever Modelo: Pure Sine Wave Inverter Potencia: 350 W Tipo: Onda pura
Conductores	Calibre 6 AWG – Marca: Hebei Huatong Wires & Cables Calibre 14 AWG – Marca: Centelsa Nexans
Protecciones eléctricas	Portafusibles, fusibles DC, DPS DC, breaker DC, interruptor GFCI, DPS AC
Puesta a tierra	Todos los equipos y estructuras metálicas conectados a tierra conforme a las normas de seguridad

Tabla 7*Equipos eléctricos que conforman el diseño 3.*

Componente	Descripción / Especificaciones Técnicas
Panel solar	Marca: Restarsolar Modelo: 550 W Monoperc Voc: 49.90 V Vmp: 41.96 VIs: 14 A Imp: 13.11 A Eficiencia: 21.28%
Banco de baterías	Marca: Must Modelo: LP1600 Series Tecnología: Litio Capacidad: 100 Ah
Controlador solar	Marca: Must Modelo: PC 18-8025F
Inversores	Marca: Must Modelo: PV3000 LVHM Series Potencia: 4000 W Tipo: Baja frecuencia, onda pura
Conductores	Calibre 6 y 4 AWG – Marca: Hebei Huatong Wires & Cables Calibre 8 AWG – Marca: Centelsa Nexans
Protecciones eléctricas	Portafusibles, fusibles DC, DPS DC, breaker DC, interruptor GFCI, DPS AC
Puesta a tierra	Todos los componentes metálicos y equipos conectados a tierra según las normas de seguridad eléctrica

La iluminación general de "el bosque" será proporcionada por un sistema integral de LED solar integrada S60 PRO sensor, marca Sylvania, que incluye un panel solar, una batería de litio, un sensor de movimiento y un controlador de carga MPPT, este sistema será la misma para cada diseño y la iluminación de los bancos de estudio será un LED reflector 30W, marca Sylvania.

(Los datasheet y manual de los equipos seleccionados para cada diseño se encuentra en los ANEXOS, DATASHEET Y MANUAL EQUIPOS SELECCIONADOS).

3.4. Iluminación en DIALux de “el bosque”

En el software AutoCAD, se realizó la exportación de cada uno de los diseños en plano 2D hacia DIALux, lo que permitió planificar los sistemas de alumbrado interior y exterior de “el bosque”.

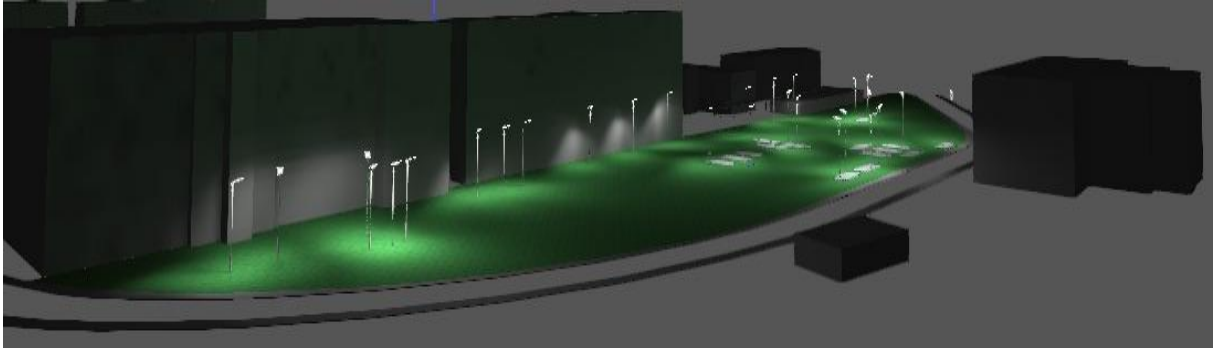
Durante el proceso de diseño en Dialux, se simularon tres tipos de luminarias con el objetivo de comparar distintas opciones de iluminación y analizar la eficiencia y distribución de la luz de cada una. Tras revisar los resultados obtenidos de los diseños en Dialux, se concluyó que las luminarias de la marca Sylvania fueron las que mostraron un mejor desempeño y mayor eficiencia en comparación con las luminarias philips y legrand (las simulaciones para cada marca de iluminaria se encuentran en los ANEXOS, DIALUX, SIMULACIONES).

Al realizar la simulación de la iluminación general de “el bosque” (**Figura 10**) trabajamos con una iluminación tipo P6 con niveles $E_m=2$ a 3 lx pero con una con una uniformidad que no superaba el 0.25. Observamos que no cumple con el criterio de uniformidad presentando falencias en las áreas iluminadas, y además que existen zonas donde la cobertura de iluminación no es posible.

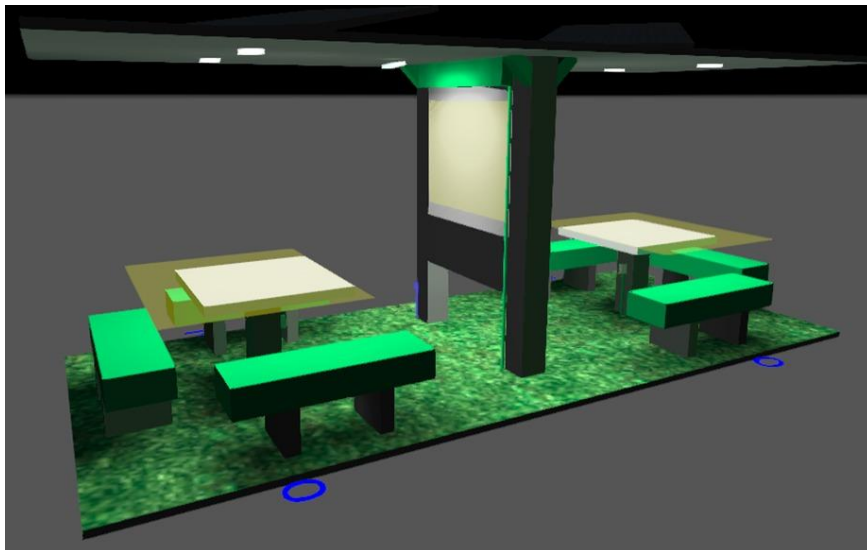
La iluminación del banco de estudios (**Figura 11**) se garantizará de manera vertical para evitar reflexiones especulares y contará con protección IP65/IK06 tanto para las mesas de estudio como para los tableros, la iluminación será de $E_m = 500$ lx con una uniformidad mínima de 0.6, Garantizando una iluminación adecuada para el desarrollo de actividades educativas y sociales durante la noche.

Figura 10

Iluminación general de “el bosque” en la Universidad Industrial de Santander.

**Figura 11**

Iluminación del banco de estudio del diseño 1 de “el bosque” en la Universidad Industrial de Santander.



(Los resultados técnicos más detallados se encuentran en los ANEXOS, DIALUX e INFORMES).

3.5. Simulación en PVSYST del rendimiento solar de cada Diseño

Con el modelado y selección de los equipos para cada uno de los diseños, aplicamos la opción de geolocalización en SketchUp que nos permitió ubicar el modelo 3D en la ciudad de Bucaramanga, específicamente en "El Bosque", asignándole coordenadas geográficas exactas. Esto nos brindó la capacidad de aproximarnos al comportamiento del sol en esta área, mejorando así la precisión de las simulaciones solares.

Con el modelado en 3D, exportamos desde SketchUp e importamos a PVsyst, donde se realizaron las simulaciones para observar el rendimiento de cada diseño, este software especializado en el diseño, simulación y análisis de sistemas solares fotovoltaicos es muy didáctico, ya que guía paso a paso en la metodología que emplea, permitiendo ingresar los datos técnicos de cada equipo, incluso si el equipo específico no aparece en su lista de datos.

Al momento de realizar el ingreso de valores de las fichas técnicas de cada equipo que conforman cada diseño en PVsyst encontramos una inconsistencia que no nos permite ingresar los datos técnicos al mismo tiempo tanto de los bancos de estudio como de los postes de iluminación general, por ende seleccionamos el sistema que alimenta los banco de estudio para la prueba de rendimiento ya que el programa no permite que los paneles solares tengan diferentes de ángulos de inclinación y azimut al momento de realizar la simulación, porque nuestras iluminarias integradas tienen distintas direcciones para alumbrar el área de "el bosque".

En el apartado de sombras cercanas, ingresamos la importación de los modelados de cada diseño. La creación de los árboles y el ajuste de los modelados 3D de "El Bosque" en los puntos cardinales visualizando en la herramienta "animación de sombreados" el movimiento del sol fueron modificaciones adicionales que contribuyeron a hacer los modelados más realistas (las

fotografías de los modelos de cada diseño, se encuentra en los ANEXOS, PVSYST, FOTOS DE LOS DISEÑOS). Estas modificaciones variaron según correspondieran a los Diseños 1 y 2 (solo banco de estudio) o al Diseño 3, teniendo en cuenta las distancias mínimas definidas por el criterio de la longitud de sombra y la reubicación de los bancos de estudio. Así, logramos realizar simulaciones en PVsyst para las tres diseños de sistemas fotovoltaicos off-grid con almacenamiento en baterías, cuyas potencias nominales fueron de 1,1 kWp (Diseño 1), 0,605 kWp (Diseño 2), y 19,8 kWp (Diseño 3). Los resultados obtenidos permiten realizar una comparación técnica en cuanto al rendimiento energético, las pérdidas asociadas y el aprovechamiento real de la energía generada.

En el Diseño 1 (1,1 kWp), orientado a cubrir consumos de aproximadamente 2,0 kWh/día, la energía útil anual alcanzó 731,46 kWh, con una producción específica de 665 kWh/kWp y un PR de 35,03 %. El sistema logró cubrir el 100 % de la demanda sin déficit de energía, pero nuevamente se presentó una fracción significativa de excedentes energéticos (901,96 kWh/año, equivalente al 54 % de la producción disponible). En este caso, la eficiencia relativa fue superior al Diseño 2, mostrando un mejor aprovechamiento del generador fotovoltaico en relación con la carga, aunque persisten importantes pérdidas debido al almacenamiento.

En el Diseño 2 (0,605 kWp), se obtuvo una producción útil anual de 370,11 kWh, con una producción específica de 612 kWh/kWp y un Performance Ratio (PR) de 32,22 %. La demanda de 1,0 kWh/día se cubrió completamente (SF = 100 %), sin faltantes de energía, pero con un excedente de 589,23 kWh/año, equivalente al 59 % de la energía disponible. Este comportamiento muestra que, aunque el sistema garantiza confiabilidad en el suministro, la mayor parte de la energía no se aprovecha debido a la saturación de las baterías.

En el Diseño 3 (19,8 kWp), dimensionado para una demanda mayor (aproximadamente 29,7 kWh/día), se obtuvo una producción útil anual de 10.849,26 kWh, con una producción específica de 548 kWh/kWp y un PR de 28,86 %. A pesar de la mayor generación, el sistema presentó 18.147,18 kWh/año de energía excedente (61 % de la energía total captada), lo que indica un sobredimensionamiento del campo fotovoltaico en relación con la capacidad de almacenamiento y la demanda real. No obstante, este diseño asegura de manera robusta la cobertura de la carga, eliminando cualquier riesgo de déficit energético.

En los tres casos, la fracción solar (SF) fue del 100 %, y las pérdidas por sombreado no superaron el 5 %, lo que indica independencia total de la red y una buena generación solar. Sin embargo, las pérdidas por saturación de baterías y el exceso de generación son dominantes, representando más del 50 % de la energía captada en todos los escenarios.

(Cada diseño cuenta con el documento detallado que evalúa el rendimiento energético y se encuentra en los ANEXOS, PVSYST, INFORME RENDIMIENTO)

3.6. Diagramas unifilares de cada Diseño

El diagrama unifilar del sistema fotovoltaico off-grid propuesto para el sector “el bosque” (cada esquema unifilar se evidencia en los ANEXOS, AUTOCAD, PLANOS) constituye la representación esquemática de la arquitectura eléctrica diseñada. En él se identifican los principales componentes del sistema: los módulos solares fotovoltaicos, el controlador de carga, el banco de baterías y el inversor.

Este esquema permite visualizar de forma clara y concisa el flujo de energía, desde la captación en los paneles solares hasta la conversión en corriente alterna en el inversor. Asimismo,

facilita la comprensión integral del diseño eléctrico, lo que contribuye a su adecuada interpretación durante la instalación.

La iluminaria LED solar integrada S60 PRO sensor fue diseñada por el proveedor, por lo que no se realizó un diseño propio ni se elaboró un diagrama unifilar, ya que la configuración y conexión del sistema fue definida por el fabricante. En consecuencia, el diseño y la integración de los componentes eléctricos y fotovoltaicos fueron gestionados directamente por el fabricante, no por nuestro diseño.

4. Realizar el análisis financiero social y ambiental de la propuesta de diseño

Se llevaron a cabo los análisis correspondientes durante el desarrollo del proyecto, destacando tanto los aspectos positivos como los negativos que se evidenciaron a lo largo de su ejecución.

4.1. Análisis financiero

El análisis financiero de las tres propuestas de diseño del sistema fotovoltaico off-grid evidencia que, si bien el proyecto es técnicamente factible, presenta serias limitaciones desde la perspectiva económica. La inversión inicial (CAPEX) contempla los costos de adquisición de equipos eléctricos y electrónicos, los postes metálicos, la obra civil, transporte, mano de obra calificada, equipos de protección personal y documentación técnica. Adicionalmente, se incorporan los costos de instalación y adaptación del terreno, los cuales aumentan proporcionalmente la magnitud económica de cada propuesta.

En cuanto a los costos de operación y mantenimiento (OPEX), se definió un esquema de mantenimientos preventivos semestrales para paneles y banco de baterías, y anuales para el resto de los equipos, lo que genera egresos recurrentes a lo largo del ciclo de vida útil. A estos se suma

el reemplazo del banco de baterías cada 10 años, un componente de alto costo que impacta de manera significativa la rentabilidad del sistema.

Los resultados obtenidos con indicadores financieros refuerzan esta conclusión. El cálculo del Retorno de la Inversión (ROI) muestra valores negativos en todos los diseños, no se recupera dinero sobre la inversión. El Valor Actual Neto (VAN), calculado con una tasa de descuento del 15 % para reflejar el nivel de riesgo del proyecto, resultó negativo en las tres propuestas, confirmando que los flujos de ahorro anual no superan la inversión inicial ni los gastos asociados. Finalmente, la Tasa Interna de Retorno (TIR) no arrojó valores numéricos válidos en Excel, lo que sugiere que el proyecto no alcanza un punto de rentabilidad dentro del horizonte de análisis (el desarrollo del análisis financiero se encuentra en los ANEXOS, FINANCIERO).

4.2. Análisis social

El desarrollo de los diseños fotovoltaicos off-grid fue socializado con estudiantes de la Universidad Industrial de Santander, quienes sugirieron la inclusión de techos, con el fin de ofrecer protección ante las variaciones climáticas y garantizar la continuidad de las actividades en el sector “el bosque”. Se evidenció una percepción favorable hacia los diseños 1 y 3, principalmente por incorporar cubiertas que brindan resguardo tanto frente a la radiación solar directa como durante los días de lluvia. Esta característica fue especialmente valorada por la comunidad universitaria, al facilitar el uso de las mesas de estudio en diversas condiciones climáticas, promoviendo la comodidad y la continuidad de las actividades académicas y recreativas en dicho espacio.

Por el contrario, el diseño 2, al ser más sencillo y básico, no ofrece cobertura frente al sol ni la lluvia, lo que limita su uso durante la jornada diurna y reduce el atractivo del espacio para permanecer estudiando o realizando actividades al aire libre. En consecuencia, la comunidad

universitaria muestra una mayor aceptación hacia las propuestas que no solo aportan iluminación y alimentación eléctrica, sino que además garantizan condiciones de confort y resguardo climático en un entorno natural.

4.3. Análisis ambiental

En el componente ambiental se destaca que el Diseño 3 presenta una ventaja significativa frente a los otros dos, ya que su sistema de generación solar se ubica por fuera del área del bosque. Esto evita la necesidad de realizar talas extensivas de árboles y permite que los bancos de estudio se integren de manera más armónica con la alta arborización característica del lugar, sin requerir distancias adicionales entre ellos para garantizar la captación solar. En contraste, en el Diseño 1 y el Diseño 2, los paneles fotovoltaicos se encuentran incorporados directamente en la estructura de los bancos, lo cual obliga a mantener una distancia mínima respecto a la vegetación circundante para evitar sombreados. Esta condición aumenta la probabilidad de intervenciones sobre el arbolado y reduce la compatibilidad de estos diseños con el entorno natural. En consecuencia, el Diseño 3 se consolida como la alternativa más respetuosa con la dinámica ecológica del bosque, ya que minimiza la afectación de la cobertura vegetal y favorece una integración más sostenible con el ambiente de la Universidad Industrial de Santander.

4.4. Tabla de decisión

Finalmente, se elaboró una tabla de decisión en la que se definen los criterios de cumplimiento en los ámbitos **financiero, ambiental y social**, asignando los siguientes porcentajes de ponderación: **50%** para el ámbito financiero, **25%** para el ambiental y **25%** para el social. Esta tabla se puntuará en una escala de 1 a 3, donde 1 representa el peor puntaje y 3 el mejor. Al final,

el diseño que obtenga la mayor cantidad de puntos será considerado como el mejor diseño (**Tabla 8**).

Tabla 8

Tabla de decisión para elección de diseño con mejores prestaciones.

Porcentaje [%]	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Ámbito
50%	1	3	2	Capex y Opex
25%	1	2	3	Ambiental
25%	2	1	3	Social
100%	4	6	8	Total

La mejor opción de diseño que nos propone la tabla con respecto a los ámbitos evaluados, es el diseño 3. Sin embargo, es importante aclarar que ninguno de los diseños analizados cumple con la viabilidad necesaria para su implementación como proyecto real.

5. Conclusiones

Aunque los tres diseños propuestos cumplen con los objetivos técnicos y ambientales establecidos, desde una perspectiva financiera no resultan ser inversiones sostenibles. La alta inversión inicial, el costo recurrente de mantenimiento y la necesidad de reemplazo periódico de las baterías hacen que los indicadores de rentabilidad sean desfavorables, presentando valores negativos en términos de ROI VAN y TIR.

En cuanto al rendimiento de los sistemas fotovoltaicos off-grid, se observa que la producción de energía es suficiente para satisfacer las necesidades de "el bosque". Sin embargo, existe una sobreproducción considerable, lo que genera excedentes de energía que terminan siendo perdidos, además de un sobrecalentamiento de los equipos. Esto se debe a los ajustes realizados

en la selección de equipos y a los días de autonomía que genera un sobredimensionamiento, ya que no se encontraron componentes comerciales que coincidieran exactamente con los valores presentados en los cálculos eléctricos solares y los días que debe suplir la generación cuando hay días nublados o de poca radiación solar.

La iluminación en "El Bosque" de la Universidad Industrial de Santander presentó la dificultad de cumplir con los estándares de uniformidad en la iluminación general, debido a la gran cantidad de vegetación presente en el área y a la restricción que nos genera el hecho de tener luminarias solares en el diseño.

6. Recomendaciones

Se recomienda implementar este proyecto con un enfoque educativo y netamente académico, con el propósito de que sirva como base para futuros proyectos de investigación en ingeniería y otras áreas de estudio, considerando los desafíos ambientales asociados.

Con el fin de lograr una iluminación uniforme en "el bosque", se sugiere la tala de algunos árboles, incluso en las áreas donde no hay penetración directa de radiación solar. Esto permitirá la instalación de más postes de iluminación, ajustando los ángulos y orientaciones de las luces, lo que garantizaría una cobertura total y adecuada en toda la zona.

Para mejorar los resultados en las simulaciones de PVSYST y evitar los excedentes de energía causados por un sobredimensionamiento, se recomienda ampliar la búsqueda de equipos solares, especialmente en sitios web de Europa. Esto facilitaría la coherencia entre los cálculos eléctricos y los datos técnicos de los equipos, mejorando la precisión de las selecciones.

Referencias Bibliográficas

De Minas Y Energia, C. M. (2004). Resolución 18 0398 de abril 7 de 2004. Por el cual se expide el Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE).

Colombia. Ministerio de Minas y Energía. (2024, mayo 3). Resolución 40150 de 2024, por la cual se modifica el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público – RETILAP. Diario Oficial de Colombia.

De Normas Técnicas Y Certificación, I. I. C. (2002). Código eléctrico colombiano: Norma Técnica Colombiana, NTC 2050.

Gómez, A. R. (2019). Energía solar fotovoltaica: autoconsumo: energía solar térmica.

Padilla, E. P. (n.d.). TODO LO QUE NECESITAS SABER SOBRE LA ENERGÍA SOLAR _ BORJA PÉREZ _ V0.1. Scribd. <https://es.scribd.com/document/481415906/TODO-LO-QUE-NECESITAS-SABER-SOBRE-LA-ENERGIA-SOLAR-BORJA-PEREZ-V0-1>.

Manual de evaluación de estudios ambientales: criterios y procedimientos. (2002).

Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible - Gestor Normativo. (s/f). Gobernador.co. Recuperado el 30 de septiembre de 2025, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2008). NTC 4552-1: Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos) – Parte 1: Principios generales. ICONTEC.

Cálculo de la posición del sol en el cielo para cada lugar en cualquier momento. (s/f).
Sunearthtools.com. Recuperado el 30 de septiembre de 2025, de
https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es

JRC photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European commission.
(2016, enero 11). Europa.Eu. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

NASA POWER Data Access Viewer (DAV). (s/f). Prediction Of Worldwide Energy
Resources (POWER). Recuperado el 30 de septiembre de 2025, de
<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>