

**Diseño de kits de sistemas solares fotovoltaicos Off-Grid para comunidades rurales
en zonas no interconectadas de alta y media Guajira**

Joseph Gregory Maestre Salcedo

Luis Fernando Rivera Padilla

Asesor

Ing. Maira Cecilia Gasca Mantilla.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingenierías ECBTI

Ingeniería Electrónica

2025

Nota de Aceptación

Firma del Evaluador

Firma del Director

Dedicatoria

Este proyecto de grado es un homenaje a los valientes soñadores que, a pesar de las dificultades, persisten con determinación. En primer lugar, lo dedico a Dios, Creador y fuente inagotable de sabiduría y fortaleza, por acompañarme en cada paso de este camino. Con profundo amor y eterno agradecimiento, dedico este logro a la memoria del Ingeniero, MSc. y PhD. José Gregorio Maestre Rivera [Q.E.P.D], cuyo ejemplo de excelencia, entrega profesional y valores humanos continúa guiando mi vida. Asimismo, a mi madre, Deyis Teresa Salcedo Padilla [Q.E.P.D], por su amor incondicional y su presencia espiritual, que han sido el motor de mi perseverancia. Mi gratitud al PhD José Gregorio Barraza Morón por su orientación académica y generoso acompañamiento, y al Ingeniero Néstor Fernando Martínez Pereira, por su valioso respaldo técnico a lo largo del desarrollo de este trabajo. Extiendo esta dedicatoria a mis compañeros de lucha, JGRZ, DSMM y demás colegas que me han acompañado en este proceso, así como a mi familia, sostén esencial en cada etapa de mi formación personal y profesional. Finalmente, agradezco de manera especial a la MSc. Graciela Maestre Rivera, tutora incansable, quien ha brindado no solo su conocimiento y experiencia, sino también su guía espiritual y apoyo humano en los momentos más significativos de este recorrido académico.

Joseph Gregory Maestre Salcedo

Dedico este proyecto de grado, con el corazón lleno de gratitud y profundo respeto, a las dos personas que han sido pilares fundamentales en mi vida: mi madre, Dina Luz Padilla Ospino y mi padre, Luis Hernando Rivera. A mi madre, por ser la luz incansable que ha iluminado mi camino incluso en los momentos más oscuros de esta travesía académica, su amor incondicional, su voz de aliento cuando todo parecía derrumbarse y su ejemplo de entrega y lucha han sido el motor esencial en mi proceso de formación. Gracias, mamá, por creer en mí incluso cuando yo

dudaba, por ser mi refugio y mi impulso, por tus oraciones silenciosas, tus desvelos, tus consejos, y por acompañarme con amor en cada paso, aunque a veces no supieras cómo ayudar, pero siempre estuviste ahí. Este logro es tuyo, porque sin tu fuerza y tu fe, yo no estaría escribiendo estas líneas.

A mi padre, por ser el ejemplo de responsabilidad, constancia y compromiso, su apoyo ha sido firme y silencioso, pero profundamente presente, gracias por enseñarme que el trabajo digno y el esfuerzo diario son el verdadero camino hacia el éxito, por tus palabras sabias, tu paciencia en mis momentos de estrés y tu orgullo silencioso que siempre me alentó a dar lo mejor de mí, gracias por demostrarme que se puede construir con disciplina y humildad y por brindarme siempre un respaldo incondicional, incluso cuando el cansancio o las dificultades me hicieron pensar en rendirme.

A ustedes, mis padres, les debo no solo este título, sino cada valor que me define. Esta dedicatoria es apenas una pequeña muestra de todo el amor, el respeto y la admiración que les profesó. Este logro académico lleva impreso cada uno de sus sacrificios y representa el fruto de una educación cimentada en el amor, la entrega y el ejemplo.

Gracias por todo, esto es de ustedes.

Luis Fernando Rivera Padilla

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero y profundo agradecimiento, en primer lugar, a Dios, por darme la fuerza y sabiduría necesaria durante este camino. Agradezco de manera especial a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, por abrirme las puertas a una formación profesional de alta calidad, flexible y cercana a las realidades del entorno.

Extiendo mi gratitud a cada uno de los docentes que, con vocación, entrega y paciencia, me han acompañado en este proceso. Gracias a sus enseñanzas, no solo fortalecí mis conocimientos técnicos, sino también mi capacidad crítica y mi compromiso con la innovación. Sus orientaciones han sido clave para avanzar con firmeza y responsabilidad en los distintos desafíos académicos y profesionales que he enfrentado.

A los ingenieros Maira Cecilia Gasca Mantilla. En compañía de nuestro codirector externo Jose Gregorio Barraza Morón, que desde un principio mostraron su mejor disposición y entrega en la realización de este trabajo de grado.

Joseph Gregory Maestre Salcedo

Agradezco, en primer lugar, a Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, por brindarme la claridad mental y espiritual necesaria para perseverar a lo largo de este proceso formativo, guiando cada paso con propósito y convicción. Extiendo mi más sincero reconocimiento a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), por ofrecer un modelo educativo flexible e inclusivo que me permitió avanzar en mi formación profesional sin descuidar otras responsabilidades personales. Valoro profundamente la paciencia, el profesionalismo y el compromiso de sus tutores, quienes, con una vocación ejemplar, acompañaron con dedicación cada etapa del proceso académico. En especial, agradezco a la tutora Maira Cecilia Gasca Mantilla, por su disposición permanente, su orientación precisa y su entrega en el desarrollo de los laboratorios, donde su

acompañamiento fue fundamental para el logro de los objetivos. Asimismo, expreso mi reconocimiento a la Consejería Académica, por su apoyo constante, su cercanía y su compromiso incansable en el seguimiento y cumplimiento de cada una de las actividades programadas. A todos ellos, gracias por ser parte esencial de esta etapa culminante de mi formación.

Luis Fernando Rivera Padilla

Resumen

El presente proyecto se enfoca en el diseño de kits de sistemas solares fotovoltaicos off-grid para comunidades rurales en zonas no interconectadas de la Alta y Media Guajira, Colombia. Estos territorios presentan serios problemas de suministro de energía eléctrica debido a su desconexión del sistema nacional y a la deficiencia en el servicio de los operadores locales. La propuesta busca desarrollar soluciones de energía renovable que mejoren la autonomía energética de estas comunidades, promoviendo el desarrollo rural, la eficiencia energética y la sostenibilidad. La implementación de estos sistemas tiene el potencial de transformar positivamente la calidad de vida de las poblaciones vulnerables, incluidos grupos étnicos y comunidades afrocolombianas, al proporcionar una fuente de energía fiable y limpia. Este proyecto propone la creación de kits personalizados, basados en un análisis detallado de las necesidades energéticas y las condiciones locales, para facilitar el acceso a la electricidad y contribuir al desarrollo socioeconómico de la región Cárcamo Posada, D. (2021).

Palabras Clave: Sistemas Solares Fotovoltaicos, Autonomía Energética, Desarrollo Rural, Impacto Social, Eficiencia Energética, Sostenibilidad.

Abstract

This project focuses on the design of off-grid photovoltaic solar system kits for rural communities in non-interconnected areas of Alta and Media Guajira, Colombia. These territories face serious electricity supply problems due to their disconnection from the national grid and the deficient service provided by local operators. The proposal seeks to develop renewable energy solutions that improve the energy autonomy of these communities, promoting rural development, energy efficiency, and sustainability. The implementation of these systems has the potential to positively transform the quality of life of vulnerable populations, including ethnic groups and Afro-Colombian communities, by providing a reliable and clean energy source. This project proposes the creation of customized kits, based on a detailed analysis of energy needs and local conditions, to facilitate access to electricity and contribute to the socioeconomic development of the region (Cárcamo Posada, D. (2021).

Keywords: Photovoltaic Solar Systems, Energy Autonomy, Rural Development, Social Impact, Energy Efficiency, Sustainability.

Tabla de Contenido

Introducción.....	14
Justificación.....	16
Objetivos.....	18
Objetivo General.....	18
Objetivos Específicos.....	18
Planteamiento del Problema.....	19
Estado del Arte.....	21
Marco Referencial.....	24
Marco Conceptual.....	24
Marco Teórico.....	24
Marco Legal.....	26
Norma Técnica Colombiana NTC 2050 (1998 y 2020).....	26
Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE 2024).....	27
Criterios de Estructuras.....	29
Requisitos Mecánicos en Estructuras o Apoyos de Líneas.....	30
Requisitos Generales de Redes de Distribución Según el RETIE 2024.....	31
Marco Metodológico.....	33
Tipo de Investigación.....	33
Diseño de la Investigación.....	33
Población de Estudio.....	35
Técnicas e Instrumentos de Recolección de información.....	36
Análisis y Resultados.....	37

Información Parámetros Técnicos y Normativos Necesarios para el Diseño de	
Sistemas Solares Fotovoltaicos Off-Grid.	37
Diagnóstico de la Situación Energética Actual	37
Recursos Necesarios	37
Estructuras y Soportes	40
Tipos de Inversores.....	41
Tipos de Barias Permitidas	41
Conductor Fotovoltaico Comercializados Por Centelsa.....	42
Protección Contra Sobretensiones y Rayos	42
Metodología integral para el diseño de sistemas solares fotovoltaicos off-grid.....	42
Diseño y Cálculos Mecánicos en los Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid.....	43
Diagrama de Flujo del sistema	43
Desarrollo de Cálculos Mecánicos.	44
Validación Final de Estructura y Factores de Seguridad.....	46
Diseño Eléctrico y Electrónico del Sistema Off-Grid	48
Plano General Sistema 3.3kWp	53
Plano General Sistema 2kWp	55
Plantilla de Cálculos	60
Portada de Inicio en Excel.....	60
Comparación de Simulaciones	63
Simulación en PVsyst.....	63
Simulación en Simulink de MATLAB.....	64

Comparación de Resultados entre las simulaciones realizadas	64
Validación PV*SOL	65
Validación SIMULINK-MATLAB	67
Conclusiones.....	76
Recomendaciones	78
Referencias Bibliográficas.....	79

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Recursos Necesarios</i>	38
---	----

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Diagrama de Flujo del Funcionamiento del Sistema.</i>	44
Figura 2 <i>Diagrama Unifilar y Esquema de Conexión 3kwp.</i>	54
Figura 3 <i>Diseño Detallado de Sistema Autónomo 2kwp.</i>	56
Figura 4 <i>Instalación Interna para la Vivienda</i>	56
Figura 5 <i>Detalle General de Estructuras y Cimentacion.</i>	58
Figura 6 <i>Plantilla Excel Dedicada al Cálculo de Sistemas Solar</i>	61
Figura 7 <i>Diagrama de Árbol de Cargas Típico para Sistema Fotovoltaico Off-Grid.</i>	63
Figura 8 <i>Validación del Sistema de 3.3kwp.</i>	66
Figura 9 <i>Verificación de Módulos Seleccionados.</i>	67
Figura 10 <i>Validación de Parámetros Iniciales en el Aplicativo Matlab.</i>	68
Figura 11 <i>Validacion del Sistema en Respuesta a la Generacion y Consumo.</i>	69
Figura 12 <i>Estado de Cargas de Baterías, Representada en % y Horas.</i>	70
Figura 13 <i>Validación de Parámetros Iniciales en el Aplicativo Matlab.</i>	72
Figura 14 <i>Graficas de Generación Vs Consumo de la Vivienda.</i>	73
Figura 15 <i>Validación de Cargas de Baterías.</i>	74

Introducción

En Colombia, gran parte de la región de La Guajira, particularmente las zonas rurales de la Alta y Media Guajira, presenta serias deficiencias en el acceso al servicio de energía eléctrica. Estas comunidades, en su mayoría pertenecientes a la población indígena Wayuu, enfrentan múltiples desafíos derivados de la falta de conexión a la red eléctrica nacional. En este contexto, la implementación de sistemas solares fotovoltaicos off-grid representa una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable para proporcionar soluciones energéticas sostenibles, autónomas y adaptadas a las condiciones locales.

Este proyecto de grado tiene como objetivo diseñar e implementar un sistema solar fotovoltaico autónomo (off-grid), dimensionado a partir del análisis de consumo de tres viviendas tipo, para extrapolar un modelo replicable en comunidades con características similares. Para lograrlo, se han integrado metodologías de levantamiento de información, simulaciones técnicas con software especializado como PvSyst y Simulink-MATLAB, y normativas colombianas vigentes como el RETIE 2024, el Reglamento de Instalaciones Eléctricas, y guías de entidades como el IPSE y los fondos FAER y FAZNI.

La estructura del proyecto abarca un estudio teórico y conceptual de los sistemas solares fotovoltaicos, incluyendo componentes como paneles solares, controladores MPPT, bancos de baterías, inversores, sistemas de puesta a tierra y protecciones contra sobretensiones. A su vez, se profundiza en el diseño eléctrico y mecánico del sistema, incluyendo el análisis estructural de soporte de los paneles, el cálculo de árboles de cargas, validación de esfuerzos y factores de seguridad, asegurando que las estructuras propuestas sean seguras y sostenibles ante condiciones climáticas adversas.

A través del desarrollo del proyecto, se realizaron simulaciones comparativas en PvSyst y Simulink para validar el rendimiento energético del sistema, optimizando la relación entre generación, almacenamiento y consumo. Estas simulaciones permiten establecer parámetros de eficiencia, pérdidas por temperatura, sombreado y orientación de paneles, así como la capacidad real del sistema para abastecer las cargas críticas.

En la fase final del trabajo, se presentan los resultados obtenidos, incluyendo el análisis de fuentes de información, la definición metodológica del diseño, la comparación del modelo técnico frente a otros recursos didácticos disponibles, y la validación de su aplicabilidad en campo. Se concluye con recomendaciones para su implementación a escala comunitaria, con un enfoque técnico y social, resaltando la importancia de la energía solar como motor de desarrollo para zonas marginadas.

Este documento busca no solo proponer una solución energética sostenible, sino también generar un insumo técnico que pueda ser utilizado por instituciones, ONG, entes territoriales y otros actores que trabajan por el desarrollo de comunidades rurales apartadas.

Justificación

La ausencia de acceso constante a la energía eléctrica en la Alta y Media Guajira limita severamente las oportunidades de desarrollo económico, social y educativo de las comunidades, generando condiciones de vulnerabilidad que perpetúan la desigualdad regional. En este contexto, el diseño de kits de sistemas solares fotovoltaicos off-grid surge como una alternativa pertinente, ya que integra un enfoque metodológico riguroso, una solución práctica de implementación y un impacto social positivo.

En primer lugar, desde la perspectiva metodológica, la propuesta se enmarca en la investigación aplicada, que busca resolver un problema real mediante la articulación entre diagnóstico técnico, caracterización del territorio y diseño de prototipos energéticos ajustados a las condiciones locales. Asimismo, el proceso considera criterios normativos establecidos en el RETIE, 2024 y lineamientos de entidades como el IPSE, garantizando que los sistemas diseñados sean seguros, replicables y adaptados a los entornos rurales dispersos.

Por otra parte, en lo referente al componente práctico, el proyecto radica en que los kits solares propuestos son modulares, autónomos y de bajo mantenimiento, lo cual facilita su instalación en viviendas y espacios comunitarios sin requerir redes eléctricas extensas ni costosas. Además, estos sistemas se componen de paneles solares, inversores, baterías y dispositivos de protección seleccionados bajo criterios de eficiencia y durabilidad, de modo que puedan operar en condiciones ambientales adversas como altas temperaturas, radiación intensa y fuertes vientos, características propias de La Guajira UPME, 2022. En consecuencia, la estandarización de los kits no solo favorece su escalabilidad, sino que también facilita la capacitación de la comunidad para su operación y mantenimiento.

De igual manera, en cuanto al impacto social, la implementación de los sistemas solares transforma directamente la calidad de vida de los habitantes, pues la disponibilidad de electricidad garantiza iluminación adecuada, refrigeración de alimentos y medicamentos, así como el uso de herramientas tecnológicas para la educación y la comunicación. Así, estos beneficios contribuyen al bienestar colectivo y a la inclusión digital. Del mismo modo, la autosuficiencia energética fomenta la seguridad alimentaria, abre oportunidades de emprendimiento rural y fortalece la resiliencia comunitaria frente a la exclusión histórica en el acceso a servicios básicos. En este sentido, la propuesta se articula con los objetivos de programas nacionales como el FAZNI y el FAER, que buscan ampliar la cobertura eléctrica en territorios apartados mediante soluciones sostenibles.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar kits de sistemas solares fotovoltaicos off-grid adaptados a las necesidades energéticas de las comunidades rurales en las zonas no interconectadas de Alta y Media Guajira, para mejorar la autonomía energética, fomentar el desarrollo rural y promover la sostenibilidad.

Objetivos Específicos

Establecer la fuente de información parámetros técnicos y normativos necesarios para el diseño de sistemas solares fotovoltaicos off-grid, a partir de la revisión de normas vigentes, estándares internacionales y hojas de datos de equipos y materiales.

Definir una metodología integral para el diseño de sistemas solares fotovoltaicos off-grid en aplicaciones residenciales dentro del rango de tensión de 25V a 1000V, considerando las necesidades energéticas, las condiciones climáticas y las características específicas de las comunidades rurales de la Guajira.

Realizar el diseño eléctrico y electrónico del sistema off-grid mediante simulaciones en software especializado (PV*SOL o PVsyst, AutoCAD, Excel, Matlab, entre otros), asegurando que los resultados obtenidos cumplan con los requerimientos de eficiencia energética y sostenibilidad.

Realizar el análisis económico del sistema off-grid, incluyendo el cálculo de costos, la evaluación de viabilidad financiera y la estimación del retorno de inversión.

Planteamiento del Problema

En la carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, los estudiantes obtienen una formación fundamental en cálculo, dimensionamiento, construcción y montaje de sistemas solares fotovoltaicos, tanto ON-GRID como OFF-GRID. Sin embargo, se observa una necesidad significativa de profundizar en los conceptos teórico-prácticos para que los futuros profesionales estén mejor preparados para liderar la transición energética en Colombia y apoyar la expansión de la electrificación en áreas rurales y urbanas (Velandia, 2022). Aunque los cursos de Fundamentals of Renewable Energies y Microcontroladores y Microprocesadores abordan el concepto de diseño básico eléctrico y electrónico de sistemas solares fotovoltaicos, tanto autónomos como conectados a la red, los estudiantes requieren una formación más completa en los cálculos eléctricos y electrónicos asociados a estos sistemas. La falta de una comprensión sólida en estos cálculos limita la capacidad de los estudiantes para diseñar, implementar y optimizar soluciones fotovoltaicas de manera efectiva.

En municipios como Maicao, Uribia, Manaure, Dibulla, Riohacha y demás de la alta y media Guajira, el acceso a la energía eléctrica es muy limitado por la falta de conexión al sistema nacional. Esta situación afecta especialmente a comunidades vulnerables y se ve agravada por la mala gestión del operador de energía en la región Caribe. Las zonas no interconectadas siguen enfrentando barreras para su desarrollo, ya que sin energía es difícil avanzar en educación, salud y economía. Por eso, es urgente buscar alternativas como los sistemas solares fotovoltaicos off-grid, que permitan brindar una solución autónoma y sostenible a estas comunidades.

Por lo cual surge la siguiente pregunta: ¿Cómo mejorar la formación en diseño y cálculo de sistemas solares fotovoltaicos off-grid en los estudiantes de Ingeniería Electrónica de la UNAD, para contribuir al desarrollo energético sostenible en zonas no interconectadas de La Guajira?

Estado del Arte

En los últimos años, diversos estudios han abordado la implementación de sistemas solares fotovoltaicos aislados (off-grid) como alternativa energética para comunidades rurales colombianas no interconectadas. Investigaciones desarrolladas por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE) han demostrado que estos sistemas constituyen una solución viable, sostenible y adaptada a las condiciones geográficas y socioeconómicas de regiones como La Guajira, Chocó y Amazonas. Según datos del IPSE (2022), más de 1.5 millones de personas en Colombia carecen de acceso al servicio de energía eléctrica, siendo los sistemas solares individuales o comunitarios una de las estrategias más efectivas para cerrar esta brecha. Estas experiencias destacan la necesidad de adaptar las configuraciones técnicas de los sistemas (potencia instalada, almacenamiento, respaldo, etc.) a las condiciones particulares de consumo, irradiación solar y acceso logístico de cada territorio.

Estudios específicos sobre comunidades indígenas Wayuu en la Alta y Media Guajira han evidenciado que la implementación de tecnologías renovables debe ir acompañada de un enfoque intercultural y participativo. Investigaciones realizadas por la Universidad de La Guajira (2020) y la Universidad Nacional (2019) resaltan que las experiencias de electrificación con sistemas solares han tenido mejores resultados cuando las comunidades son capacitadas y se garantiza un modelo de operación y mantenimiento autónomo o con soporte local. Se identificaron casos exitosos en corregimientos como Nazareth, Bahía Hondita y Siapana, donde la instalación de microplantas solares ha mejorado las condiciones de salud, educación y seguridad alimentaria. No obstante, los

desafíos persisten en aspectos como el vandalismo, el deterioro por salinidad y la falta de seguimiento institucional.

El desarrollo de sistemas de almacenamiento energético ha sido clave para la viabilidad de los sistemas solares off-grid en zonas no interconectadas. En estudios recientes publicados en la *Revista Colombiana de Energía Renovable* (2021), se analizan diferentes tipos de baterías, desde las tradicionales de plomo-ácido hasta las más eficientes de litio-ferrofosfato (LiFePO₄), destacando ventajas como mayor vida útil, mejor densidad energética y menor mantenimiento. En el contexto de la Guajira, donde las altas temperaturas y la humedad pueden afectar el rendimiento de ciertos materiales, se ha comenzado a recomendar la implementación de sistemas híbridos con respaldo mediante bancos de baterías avanzados o generación diésel auxiliar para asegurar la confiabilidad del suministro. La elección adecuada del sistema de almacenamiento es crucial para lograr una operación estable, especialmente en comunidades con usos productivos o servicios básicos como refrigeración de medicamentos.

El desarrollo de soluciones energéticas para zonas no interconectadas ha sido respaldado por políticas públicas nacionales, como el *Plan Nacional de Electrificación Rural* y las estrategias del IPSE y el Ministerio de Minas y Energía. Programas como el FAER (Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de Zonas Rurales Interconectadas) y el FAZNI (Fondo de Apoyo a Zonas No Interconectadas) han permitido financiar la instalación de sistemas solares en comunidades dispersas, incluyendo territorios de la Alta Guajira. Sin embargo, informes de seguimiento han evidenciado limitaciones en la sostenibilidad de los proyectos debido a fallas en la operación técnica, la falta de empoderamiento comunitario y la débil articulación institucional. Estas lecciones

aprendidas resaltan la importancia de fortalecer los mecanismos de monitoreo, mantenimiento y participación comunitaria para garantizar el éxito a largo plazo de los sistemas off-grid.

Marco Referencial

Marco Conceptual

Sistema Off-Grid

Un sistema solar fotovoltaico off-grid es una instalación autónoma e independiente del Sistema Interconectado Nacional, diseñada para proveer energía eléctrica en zonas aisladas. Se compone de paneles solares, reguladores de carga, baterías de almacenamiento, inversores y elementos de protección o respaldo. Captura energía solar, la almacena y la distribuye localmente sin conexión a la red eléctrica pública.

Este modelo es ideal para áreas no interconectadas como la Alta y Media Guajira, donde no existe acceso a la red eléctrica convencional, permite incrementar la autonomía energética, disminuir emisiones contaminantes, potenciar el desarrollo local y mejorar calidad de vida, alineándose con principios de justicia energética y sostenibilidad.

Marco Teórico

El desarrollo de sistemas fotovoltaicos autónomos requiere apoyarse en fundamentos teóricos que permitan comprender los procesos de generación, almacenamiento y distribución de la energía eléctrica en ausencia de una red interconectada. En primer lugar, es necesario definir la energía solar fotovoltaica, entendida como la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica mediante dispositivos semiconductores conocidos como celdas fotovoltaicas, agrupadas en paneles solares. La magnitud que determina la energía incidente es la irradiancia solar W/m^2 , variable fundamental para el cálculo de la producción energética y utilizada en las simulaciones realizadas en este proyecto.

Otro concepto fundamental es el de sistema fotovoltaico autónomo off-grid, el cual se caracteriza por operar de manera independiente de la red eléctrica convencional, mediante la integración de paneles, baterías, inversores y controladores de carga. Su dimensionamiento se realiza en función del perfil de carga, consumo energético horario, la autonomía requerida en horas o días que debe funcionar sin sol y la profundidad de descarga de las baterías DOD, que determina su vida útil.

El componente de almacenamiento energético se soporta en la teoría de las baterías recargables, cuya capacidad se expresa en amperio-hora y cuya eficiencia depende de factores como el tipo de batería (AGM, gel, litio), la profundidad de descarga y el número de ciclos de carga-descarga. En este proyecto se aplicó el concepto de ciclos equivalentes de batería, para estimar el tiempo de reemplazo de acuerdo con la demanda real.

La conversión de corriente continua DC a corriente alterna AC, indispensable para alimentar cargas domésticas, se fundamenta en la operación del inversor, cuya potencia nominal, eficiencia y capacidad de sobrecarga determinan la aplicabilidad del sistema. Asimismo, el uso de controladores de carga con seguimiento del punto de máxima potencia MPPT, se justifica en la necesidad de optimizar la captación de energía solar, regulando la tensión y corriente de los módulos.

Otro elemento teórico esencial es la confiabilidad del suministro eléctrico, evaluada mediante indicadores como:

- Loss of Load Expectation **LoLE**: número de horas/año en las que el sistema no logra cubrir la demanda.

- Loss of Load Probability **LoLP**: probabilidad de ocurrencia de déficit energético.
- Self-consumption %: porcentaje de energía generada que es aprovechada directamente por la carga.
- Cobertura %: proporción de la demanda total cubierta con energía solar.

Finalmente, se incorporan fundamentos relacionados con la degradación de los módulos fotovoltaicos, que se expresa en un porcentaje de reducción anual de su potencia nominal, y con los modelos térmicos simplificados NOCT y coeficiente de temperatura, los cuales permiten estimar de manera más realista la producción energética bajo condiciones ambientales de la Guajira.

Marco Legal

El respaldo normativo y legal para el desarrollo y aplicación de herramientas computacionales en ingeniería eléctrica, especialmente en cálculos eléctricos y electrónicos asociados a sistemas solares fotovoltaicos, se encuentra respaldado por una serie de marcos legales y normativas. A continuación, se proporcionan algunas de las principales referencias legales pertinentes a la temática abordada:

Norma Técnica Colombiana NTC 2050 (1998 y 2020)

La Norma Técnica Colombiana NTC 2050, tanto en su versión de 1998 como en su actualización del año 2020, establece los lineamientos técnicos y de seguridad eléctrica fundamentales para el diseño e implementación de sistemas solares fotovoltaicos, incluyendo aquellos de tipo off-grid destinados a zonas no interconectadas. Esta norma, basada en el National Electrical Code (NEC), aborda de manera detallada en su artículo 690

los requisitos aplicables a instalaciones fotovoltaicas, tales como la identificación de conductores, la determinación del voltaje máximo de circuito abierto, el dimensionamiento adecuado de conductores y protecciones, y la instalación segura de bancos de baterías con medios de desconexión apropiados. Además, la sección 250 sobre sistemas de puesta a tierra resalta la necesidad de implementar una conexión equipotencial efectiva, lo cual es especialmente relevante en regiones con alta exposición a tormentas eléctricas como la Alta y Media Guajira. Asimismo, los requisitos generales del artículo 110 refuerzan la necesidad de utilizar materiales certificados y adecuados a las condiciones ambientales extremas propias de las zonas rurales del Caribe colombiano. Mientras que la versión de 1998 brindaba directrices generales sobre seguridad eléctrica, la actualización del 2020 ofrece una guía técnica más específica y alineada a los avances tecnológicos en energías renovables, permitiendo un diseño más preciso, seguro y conforme con el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE 2024), al cual complementa. En consecuencia, el cumplimiento de la NTC 2050 es indispensable para garantizar que los sistemas fotovoltaicos off-grid diseñados para comunidades no interconectadas operen con altos estándares de calidad, seguridad y sostenibilidad.

Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE 2024)

El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE 2024) constituye el marco normativo vigente en Colombia para garantizar la seguridad, confiabilidad y eficiencia de las instalaciones eléctricas, incluidas las que operan bajo esquemas de autogeneración como los sistemas solares fotovoltaicos off-grid. Este reglamento establece requisitos esenciales que aplican desde la generación hasta la utilización final de la energía, abarcando aspectos clave como la selección de materiales certificados, la protección contra

contactos directos e indirectos, la puesta a tierra, y la correcta coordinación de protecciones. En el caso de los sistemas off-grid, el RETIE 2024 enfatiza la necesidad de adoptar medidas de seguridad eléctrica en los módulos fotovoltaicos, bancos de baterías, controladores de carga, inversores y demás componentes del sistema, especialmente cuando son instalados en zonas rurales o de difícil acceso, donde el mantenimiento periódico puede ser limitado.

Asimismo, el RETIE 2024 incluye criterios técnicos y estructurales específicos para instalaciones en áreas remotas, como los requisitos mecánicos para el soporte de estructuras, la resistencia al viento, y la disposición segura de las redes de distribución internas, elementos críticos para regiones como la Alta y Media Guajira, donde las condiciones climáticas pueden ser extremas. También exige que las instalaciones cuenten con protecciones contra sobretensiones, sistemas de seccionamiento visibles y señalización adecuada, con el fin de proteger tanto a los usuarios como al personal técnico. Por otro lado, resalta la necesidad de una correcta integración con los sistemas de puesta a tierra y la gestión eficiente de la energía almacenada, aspectos vitales en sistemas off-grid donde no existe respaldo de la red pública. En este sentido, el cumplimiento del RETIE 2024 no solo asegura la viabilidad técnica del proyecto, sino también su legalidad y sostenibilidad a largo plazo.

Además de los requisitos técnicos establecidos por el RETIE 2024, los proyectos de electrificación mediante sistemas solares *off-grid* en zonas no interconectadas deben alinearse con las directrices y criterios definidos por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE). Este organismo guía la formulación y ejecución de soluciones energéticas sostenibles en

regiones apartadas del país, promoviendo el uso de energías renovables con altos estándares de eficiencia, seguridad y pertinencia cultural. Las guías técnicas del IPSE, en articulación con el RETIE, proporcionan un marco específico para el dimensionamiento, instalación y operación de sistemas solares autónomos, incluyendo parámetros como el perfil de consumo de las comunidades, la radiación solar disponible, los criterios de selección tecnológica y las condiciones ambientales del territorio, lo cual resulta fundamental en zonas áridas y dispersas como la Alta y Media Guajira.

En cuanto al componente financiero y de viabilidad del proyecto, el acceso a fondos de apoyo estatal como el Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas No Interconectadas (FAZNI) y el Fondo de Apoyo para la Energización Rural (FAER), permite la implementación de estas soluciones en territorios históricamente excluidos del servicio eléctrico convencional. Ambos fondos están diseñados para financiar obras que se ajusten a los lineamientos técnicos del RETIE y a las políticas del Ministerio de Minas y Energía, y exigen, como condición, que los proyectos estén debidamente estructurados, incluyendo estudios de factibilidad, impacto social, sostenibilidad técnica y cumplimiento normativo. En este contexto, la correcta aplicación de los requisitos del RETIE 2024 no solo garantiza la seguridad técnica del sistema *off-grid*, sino que también constituye un requisito indispensable para la aprobación, cofinanciación e implementación efectiva de proyectos a través de estos mecanismos institucionales.

Criterios de Estructuras

El diseño e instalación de estructuras para sistemas solares fotovoltaicos *off-grid* debe cumplir con los criterios establecidos en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE 2024), específicamente en lo relacionado con la resistencia mecánica,

seguridad estructural, durabilidad y adecuación al entorno geográfico. Las estructuras que soportan los módulos fotovoltaicos deben garantizar estabilidad frente a cargas permanentes, viento, vibraciones y otras solicitaciones externas, considerando la topografía, el tipo de suelo y las condiciones climáticas extremas características de regiones como la Alta y Media Guajira.

Según el RETIE 2024, estas estructuras deben ser construidas con materiales resistentes a la corrosión, preferiblemente galvanizados o en aluminio anodizado, para asegurar una vida útil prolongada bajo exposición solar intensa, humedad relativa variable y partículas abrasivas. Además, deben contar con sistemas de anclaje firmes y correctamente dimensionados, preferiblemente enterrados o cimentados en concreto, evitando instalaciones improvisadas o frágiles que comprometan la integridad de los módulos o generen riesgos eléctricos por desprendimientos. En sistemas aislados, donde el mantenimiento puede ser limitado, la robustez estructural es aún más crítica para prevenir fallas durante el ciclo operativo del sistema. Así mismo, deben contemplarse criterios de inclinación óptima y orientación de los paneles para maximizar la captación solar, asegurando al mismo tiempo el acceso para labores de mantenimiento preventivo y correctivo. Finalmente, las estructuras deben instalarse de forma que se minimicen las sombras proyectadas y se respeten las distancias de seguridad definidas en el RETIE para evitar interferencias mecánicas o eléctricas con otros elementos del entorno.

Requisitos Mecánicos en Estructuras o Apoyos de Líneas

En los sistemas solares off-grid, los requisitos mecánicos asociados al tendido y apoyo de líneas eléctricas son fundamentales para garantizar la seguridad, durabilidad y funcionalidad de la instalación. Según el RETIE 2024, toda infraestructura de

soporte para líneas eléctricas ya sea aérea o subterránea, debe cumplir criterios de resistencia estructural frente a cargas mecánicas (viento, tensión del cable, impacto ambiental) y contar con materiales adecuados al entorno de operación. En zonas rurales como la Alta y Media Guajira, donde las condiciones climáticas incluyen altas temperaturas, vientos fuertes y exposición prolongada al sol, se deben emplear postes o estructuras fabricadas en concreto reforzado, madera tratada o acero galvanizado, resistentes a la corrosión y al deterioro por agentes externos.

Además, el RETIE exige que los apoyos de línea aseguren el correcto tensado de los conductores, evitando pandeos excesivos o sobrecargas, y que se respete la altura mínima de instalación sobre el terreno para prevenir accidentes con personas o animales. Las distancias entre apoyos deben calcularse de acuerdo con la tensión nominal de operación, el calibre del conductor y las condiciones ambientales. También se debe prever la adecuada señalización de cruces con caminos, ríos o zonas habitadas, así como la instalación de protecciones mecánicas en los puntos donde los cables puedan estar expuestos a daños físicos. El uso de herrajes certificados, aisladores de porcelana o poliméricos, y la correcta puesta a tierra de cada estructura son requisitos ineludibles para asegurar la integridad del sistema y la protección de los usuarios.

Requisitos Generales de Redes de Distribución Según el RETIE 2024

El RETIE 2024 establece que toda red de distribución eléctrica, incluso en sistemas solares off-grid, debe diseñarse con base en principios de continuidad del servicio, eficiencia energética, protección contra sobrecorrientes, sobretensiones, cortocircuitos y seguridad frente a contactos directos o indirectos. En el contexto de zonas no interconectadas, las redes de distribución deben ser adaptadas al perfil de carga de las

comunidades, considerando si se trata de redes monofásicas o bifásicas, y utilizando conductores adecuados al nivel de tensión (normalmente 120/240 V en sistemas off-grid residenciales o comunitarios).

Además, el diseño debe incorporar protecciones como interruptores termomagnéticos, fusibles, sistemas de puesta a tierra, pararrayos y protección diferencial cuando aplique. Se requiere que los tableros de distribución cuenten con canalizaciones adecuadas, rotulado visible y accesible, y que se evite el cruce de conductores con instalaciones hidráulicas o de gas. Las redes deben diseñarse para facilitar futuras expansiones o mantenimiento, utilizando canalizaciones o bandejas que respeten la normativa vigente. Así mismo, deben incluir dispositivos de desconexión accesibles y protegidos frente a humedad, polvo e interferencias físicas. Finalmente, es indispensable que las redes de distribución sean verificadas mediante pruebas de aislamiento, continuidad, polaridad y funcionamiento de protecciones, según los procedimientos exigidos por el RETIE 2024, asegurando que la instalación pueda operar de manera segura, confiable y eficiente a largo plazo.

Marco Metodológico

Tipo de Investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, pues se sustenta en la recopilación, análisis y sistematización de datos técnicos, energéticos y sociales, con el fin de dimensionar y validar sistemas solares off-grid en la Alta y Media Guajira. En cuanto a su naturaleza, se clasifica como aplicada, dado que parte de una necesidad real identificada en comunidades con limitado acceso a la red eléctrica, y busca ofrecer soluciones técnicas útiles y replicables. Así mismo, alcanza un carácter descriptivo, ya que caracteriza el contexto energético de la región, los perfiles de consumo y la disponibilidad de radiación solar, elementos indispensables para el diseño del sistema (Patarroyo, 2022).

Por otra parte, el diseño metodológico corresponde a una investigación no experimental y transversal: no experimental porque no se manipulan las variables en condiciones de laboratorio, sino que se analizan en su entorno natural; y transversal porque la información se recoge y analiza en un periodo de tiempo definido. Este enfoque permite integrar criterios técnicos, normativos y de sostenibilidad en el diseño de los sistemas solares autónomos, alineando los resultados con los lineamientos de electrificación rural promovidos por entidades como IPSE, FAER y FAZNI (Palmera, 2021).

Diseño de la Investigación

El diseño metodológico de esta investigación se estructuró en función del cumplimiento de los objetivos específicos, estableciendo un camino claro para el desarrollo del proyecto.

En primer lugar, para establecer la fuente de información y los parámetros técnicos y normativos necesarios, se llevó a cabo una revisión documental de normas nacionales como el RETIE 2024, estándares internacionales IEC, IEEE y guías del IPSE, así como la consulta de hojas técnicas de fabricantes de equipos fotovoltaicos. Esta etapa permitió recopilar los criterios técnicos y regulatorios que fundamentaron las decisiones de diseño (Patarroyo, 2022).

Definiendo una metodología integral de diseño de sistemas solares off-grid, se establecieron pasos secuenciales que incluyen el análisis del perfil de consumo energético de las comunidades, la evaluación de las condiciones climáticas de la Guajira irradiancia y temperatura, la selección de equipos y la definición de esquemas eléctricos. Se emplearon modelos matemáticos y criterios de ingeniería para consolidar un procedimiento aplicable a diferentes escenarios residenciales en rangos de tensión entre 25V y 1000V.

Estos objetivos enfocados en el diseño eléctrico y electrónico del sistema off-grid, se utilizaron herramientas de software especializado como PVsyst, PV*SOL, AutoCAD Electrical, Matlab/Simulink y hojas de cálculo en Excel. Estas herramientas facilitaron la simulación del comportamiento energético, la representación gráfica de esquemas eléctricos y la validación del dimensionamiento de cada componente del sistema. Finalmente, el último objetivo relacionado con el análisis económico del sistema off-grid, se aplicaron metodologías de evaluación financiera que incluyen el cálculo de costos iniciales, costos operativos y de mantenimiento, así como la estimación del retorno de inversión ROI y del costo nivelado de la energía LCOE. De esta manera, se establecieron criterios comparativos que permitieron determinar la viabilidad de los sistemas propuestos en el contexto rural de la Guajira.

Población de Estudio

La población objeto de estudio de esta investigación corresponde a las comunidades rurales asentadas en las zonas no interconectadas de la Alta y Media Guajira, en el departamento de La Guajira, Colombia. Estas comunidades se caracterizan por enfrentar limitaciones significativas en el acceso al servicio de energía eléctrica convencional, debido principalmente a la ausencia de infraestructura de red y a las condiciones geográficas y socioeconómicas que dificultan su interconexión con el Sistema Interconectado Nacional (SIN).

Dentro de este contexto, el proyecto se enfoca específicamente en la Ranchería Los Guajireros, una comunidad indígena del municipio de Barrancas, La Guajira, donde las necesidades energéticas no cubiertas impactan directamente en la calidad de vida, el desarrollo social y las oportunidades económicas de sus habitantes. Por lo tanto, esta investigación busca analizar y proponer soluciones energéticas sostenibles que contribuyan al mejoramiento de las condiciones de vida y al fortalecimiento del desarrollo comunitario en esta zona.

El estudio se centra especialmente en viviendas y espacios comunitarios de carácter residencial y social, donde la disponibilidad de energía es fundamental para actividades cotidianas como la iluminación, la refrigeración de alimentos y medicamentos, la comunicación y el acceso a servicios educativos. Se considera como población de referencia a las familias de estas comunidades, cuya demanda energética promedio es de bajo a mediano consumo, lo que hace viable la implementación de sistemas solares fotovoltaicos off-grid de pequeña escala.

En este contexto, la población de estudio no solo representa un conjunto de usuarios finales, sino también el escenario de aplicación de las soluciones propuestas, ya que sus características culturales, sociales y ambientales influyen directamente en el diseño, operación y sostenibilidad de los sistemas. Por ello, el enfoque de la investigación integra tanto los aspectos técnicos como las particularidades propias de las comunidades wayuu y otras etnias presentes en la región, garantizando la pertinencia social y cultural de los kits solares diseñados.

Técnicas e Instrumentos de Recolección de información

La recopilación de datos para este proyecto se basó en un enfoque mixto que combinó métodos cuantitativos y cualitativos, con el objetivo de identificar las condiciones energéticas y socioeconómicas de los habitantes de zonas no interconectadas de la Alta y Media Guajira. Una de las principales técnicas utilizadas fue la aplicación de encuestas estructuradas directamente a las familias, mediante las cuales se recopiló información sobre la cantidad y tipo de electrodomésticos presentes en los hogares, así como sus hábitos de consumo eléctrico. Estos datos fueron organizados y procesados inicialmente en Excel, donde se realizaron cálculos de demanda energética diaria, potencia pico requerida y autonomía esperada del sistema. Luego, para validar y optimizar los diseños, se emplearon herramientas especializadas como PVsyst, PV*Sol y MATLAB/Simulink, que permitieron simular con precisión el comportamiento de los sistemas solares *off-grid* bajo condiciones climáticas reales, evaluando variables como irradiancia solar, eficiencia de los componentes, pérdidas del sistema y configuración óptima de baterías y paneles. Este proceso integral de recopilación y procesamiento garantizó un diseño técnico realista, sostenible y ajustado a las necesidades particulares de las comunidades beneficiarias.

Análisis y Resultados

Información Parámetros Técnicos y Normativos Necesarios para el Diseño de Sistemas Solares Fotovoltaicos Off-Grid

Diagnóstico de la Situación Energética Actual

En esta sección se expone el análisis de la situación energética en las zonas no interconectadas de la Alta y Media Guajira, caracterizando la falta de acceso al servicio eléctrico convencional, la dependencia de fuentes no renovables como plantas diésel, y las condiciones socioeconómicas y geográficas que afectan la cobertura energética. El diagnóstico se basó en visitas de campo, entrevistas a líderes comunitarios y encuestas aplicadas directamente a los habitantes, lo que permitió identificar la demanda eléctrica típica de los hogares, la cantidad y tipo de electrodomésticos en uso, así como la percepción de la comunidad sobre el acceso a la energía como motor de desarrollo. En muchos casos se evidenció una limitada disponibilidad energética que restringe el uso de refrigeración, iluminación adecuada, telecomunicaciones y acceso a la educación digital, lo que representa una barrera significativa para el progreso social y económico.

Recursos Necesarios

El desarrollo e implementación de sistemas solares fotovoltaicos *off-grid* en zonas no interconectadas de la Alta y Media Guajira requiere una planificación cuidadosa de los recursos, tanto humanos como materiales, técnicos, tecnológicos y financieros. Estos recursos son fundamentales para garantizar la viabilidad del proyecto, desde la etapa de diagnóstico y diseño, hasta la ejecución, puesta en marcha y seguimiento del sistema. La correcta identificación de estos elementos permite establecer una ruta clara de implementación, asegurando que los sistemas instalados cumplan con los estándares

técnicos exigidos por el RETIE 2024, la NTC 2050 y otras normativas aplicables. Además, posibilita la sostenibilidad del proyecto en el tiempo y su adaptabilidad a las condiciones específicas de las comunidades beneficiadas.

Tabla 1

Recursos Necesarios

Tipo De Recurso	Descripción	Cantidad / Unidad	Observaciones
Humano	Ingeniero electricista	1 profesional	Diseño e implementación del sistema
	Técnicos instaladores	2 técnicos	Instalación en campo
	Personal de encuestas	2 personas	Recolección de datos en comunidades
Técnico	Paneles solares monocristalinos de 550 Wp	6 paneles	Dos strings de 3 paneles en serie
	Controlador MPPT	1 unidad	Para maximizar la eficiencia de carga
	Inversor off-grid	1 unidad	Conversión DC a AC

Tipo De Recurso	Descripción	Cantidad / Unidad	Observaciones
	Baterías de ciclo profundo (Gel o Litio)	4 unidades (12V/200Ah)	Para acumulación de energía
	Cableado solar PvSyst, PvSol,	Según diseño	Cable PV certificado, se calcula por distancia
Tecnológico / Software	MATLAB/Simulink	Licencias / versiones trial	Simulación y análisis de sistemas solares
	Microsoft Excel	1 licencia	Análisis de datos y procesamiento de encuestas
Económico	Fondos para transporte, logística y viáticos	Valor estimado	Para movilización del equipo técnico
o	Recursos de financiación (FAZNI, FAER, IPSE)	Según disponibilidad	Aplicación a convocatorias estatales
Material de campo	Multímetro, pinza	1 kit completo	Para instalación y pruebas eléctricas

Tipo De Recurso	Descripción	Cantidad / Unidad	Observaciones
	amperimétrica, herramientas de instalación		
Tiempo	Tiempo estimado para instalación	1 semana por comunidad	Sujeto a condiciones climáticas y acceso

Nota. Elaboración Propia.

Estructuras y Soportes

Según el RETIE 2024, las estructuras deben ser resistentes a la intemperie, contar con puesta a tierra y cumplir con la norma IEC 62548. Se permiten estructuras en aluminio anodizado o acero galvanizado, diseñadas para soportar cargas de viento y peso estático.

- Marca RENSOL (modelo VS+ para techo inclinado).
- Marca SCHLETTER (serie FS UNO para instalación en campo).
- Marca K2 Systems (serie Dome 6 Classic para lozas planas).
- Soporte tipo coplanar o triangular para tejado metálico trapezoidal.
- Anclajes tipo “Z-clip” o “L-foot” con rieles universales de aluminio

extruido.

Tipos de Inversores

Los inversores deben cumplir la norma IEC 62109-1/2 y tener su respectiva certificación RETIE. En este proyecto y en general se requiere que sean de onda senoidal pura, de preferencia híbridos con MPPT y cargador integrado.

Modelos recomendados por fabricantes para la aplicación detallada en el marco:

- Must Solar Ph1800 Pro 3 Kw 24 Vdc.
- Solis Rhi 3.6k-48es (Híbrido, 48v).
- Growatt Spf 3000tl Lvm-24 (Off-Grid).
- Voltronic Axpert Vm li 3kw 24v.
- Victron Multiplus-Ii 48/3000/35.

Tipos de Baterías Permitidas

Las baterías deben ser estacionarias, con ciclos profundos y cumplir normas como IEC 61427 y UL 1973 (para litio). Se deben instalar en áreas ventiladas y protegidas contra cortocircuito o contacto accidental.

- AGM: marca Fullriver DC224-6, Trojan T105-RE.
- GEL: marca Hoppecke 12 OPzV 100.
- Litio (LiFePO₄): marca Pylontech US2000C, BYD B-Box 5.0, SOK 48V

100Ah.

Nota. Se recomienda usar un banco de baterías de 24V nominal para la aplicación de este proyecto. Así mismo, se escogen estos modelos basados en la alta salinidad del ambiente de las zonas a instalar.

Conductor Fotovoltaico Comercializados Por Centelsa

En esta sección, se introducen los cables CUBIERTOS CENTELSA, diseñado especialmente para estos sistemas y se caracteriza por su alta resistencia a condiciones ambientales extremas, como la exposición a rayos solares, humedad, y temperaturas variables. Está diseñado para instalaciones solares, con conductores de cobre aislados y cubiertas que garantizan seguridad y eficiencia en la transmisión de energía, cumpliendo con la NTC 2050, RETIE y norma IEC 60228 clase 5, flexibles.

Protección Contra Sobretensiones y Rayos

Un adecuado sistema de puesta a tierra en instalaciones solares fotovoltaicas es fundamental para garantizar la seguridad de las personas, la integridad de los equipos y la continuidad del servicio eléctrico. Estas protecciones evitan daños por descargas atmosféricas, transitorios eléctricos y fallas de aislamiento, al disipar las sobretensiones hacia tierra de forma controlada y segura. Su aplicación es obligatoria según la normativa colombiana RETIE 2024, especialmente en sistemas off-grid instalados en zonas rurales como la Alta y Media Guajira, donde las condiciones climáticas extremas y la exposición directa de los equipos aumentan el riesgo de fallos eléctricos. Además, contribuyen al cumplimiento de estándares internacionales de calidad y a la sostenibilidad del sistema fotovoltaico a largo plazo.

Metodología Integral para el Diseño de Sistemas Solares Fotovoltaicos Off-Grid

Aplicaciones residenciales dentro del rango de tensión de 25V a 1000V, considerando las necesidades energéticas, las condiciones climáticas y las características específicas de las comunidades rurales de la Guajira.

Diseño y Cálculos Mecánicos en los Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid

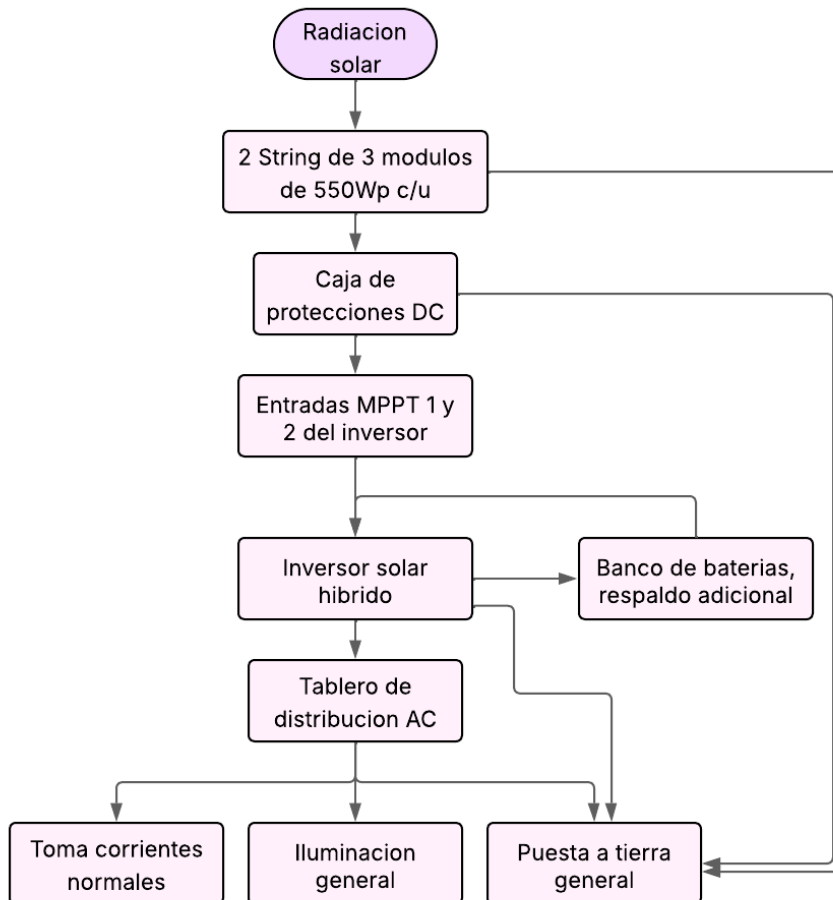
En un primer paso, desarrollamos un diagrama de flujo que incorpora las variables esenciales para llevar a cabo el diseño y cálculo mecánico en redes, tomando en consideración cada una de las hipótesis planteadas. Posteriormente, recurrimos a fuentes de información confiables especializadas en cálculos mecánicos, lo que nos permitió identificar el procedimiento matemático y físico pertinente. Este conocimiento fue posteriormente trasladado y organizado en Microsoft Excel, optimizando así la presentación y gestión de los datos de manera más efectiva.

Diagrama de Flujo del sistema

Este diagrama de flujo ilustra la secuencia operativa y de conexión de un sistema fotovoltaico off-grid de 3.3 kWp, iniciando en los módulos solares, dispuestos en dos strings de tres paneles cada uno. La energía generada fluye hacia las entradas MPPT del inversor a través de protecciones en corriente continua como interruptores y dispositivos de protección contra sobretensión (DPS). Posteriormente, pasa por un seccionador DC antes de ingresar al inversor, donde se transforma en corriente alterna. La salida AC se distribuye a través de un tablero general que alimenta tomacorrientes normales, iluminación general. Cada uno con su respectiva protección. Paralelamente, el sistema cuenta con un banco de baterías de que almacena la energía para uso posterior. Todo el sistema está interconectado a una red de puesta a tierra que garantiza la seguridad eléctrica y protege tanto a los usuarios como a los equipos.

Figura 1

Diagrama De Flujo del Funcionamiento del Sistema.



Nota. Elaboración Propia.

Desarrollo de Cálculos Mecánicos

El desarrollo de los cálculos mecánicos de este sistema fotovoltaico tiene como objetivo garantizar la estabilidad, seguridad y durabilidad de la estructura que soporta los paneles solares, considerando las condiciones ambientales del lugar de instalación. Para

este proyecto, se consideraron estructuras metálicas tipo inclinadas a 30° y estructuras en campo tipo estaca o perfil H, dependiendo del tipo de vivienda y del terreno disponible.

Los cálculos se realizaron conforme a los lineamientos de la NSR-10 Norma Sismo Resistente Colombiana, la ASCE 7-16, y las recomendaciones del RETIE 2024 para sistemas solares, aplicando los siguientes parámetros:

- Carga de viento: se calcularon las presiones ejercidas sobre los paneles considerando una velocidad básica del viento de hasta 120 km/h, típica de zonas abiertas de la Guajira. Se empleó la fórmula $P=q \cdot C_p$ donde q es la presión dinámica y C_p el coeficiente de presión sobre el panel.
- Carga estructural de peso muerto: se evaluó el peso propio de los paneles (aproximadamente 18 a 23 kg por módulo de 550 Wp), la estructura metálica (acero galvanizado calibre 14 o perfiles tipo C), y elementos de fijación. La estructura fue diseñada para resistir al menos 4 veces el peso del sistema para garantizar un factor de seguridad adecuado.
- Carga sísmica (mínima): dado que la región presenta baja amenaza sísmica, esta carga se considera poco significativa, pero se contempla un análisis cualitativo para evitar fallos estructurales en condiciones extremas.
- Distribución de esfuerzos: se determinó el número de apoyos necesarios, tipo de anclaje (químico o mecánico), profundidad de cimentación en caso de instalación en campo, y separación entre perfiles. La estructura debe soportar el peso de los paneles y resistir los esfuerzos de torsión y flexión inducidos por el viento.

El diseño se validó mediante el uso de software AutoCAD Electrical y análisis de esfuerzos con herramientas de Simulación, garantizando que las deformaciones no superen el 1% de la longitud del perfil. Para instalaciones sobre techo, se verificó que las cubiertas tuvieran la capacidad de carga estructural mínima requerida al menos 25 kg/m², y en caso contrario, se planteó la opción de estructuras en campo.

Este análisis asegura que el sistema solar no solo funcione eléctricamente, sino que también cumpla con los criterios mecánicos y estructurales necesarios para resistir las condiciones ambientales y operar de forma segura durante más de 20 años.

Para concluir, todos estos datos tomados de diferentes fuentes de información se recopilaron en un formato de Excel formulando la información recolectada de las diferentes comunidades para poder calcular los diseños a implementar, apoyándonos no solo de esos datos recopilados en Excel sino también validándolos en un software especializado y diseñado netamente para la simulación de diferentes sistemas fotovoltaicos con la ubicación exacta de la zona PVsyst.

Validación Final de Estructura y Factores de Seguridad

La validación final de las estructuras destinadas a soportar sistemas solares fotovoltaicos off-grid se realiza considerando las condiciones ambientales locales, las cargas mecánicas presentes y los factores de seguridad establecidos por normativas nacionales e internacionales. En zonas como la Alta y Media Guajira, se deben tener en cuenta factores como la alta exposición al viento, la salinidad del ambiente y la irregularidad del terreno, lo cual exige estructuras robustas y bien ancladas, tanto para instalaciones sobre cubierta como en campo abierto.

Las estructuras metálicas empleadas (acero galvanizado o aluminio) deben soportar el peso propio de los paneles, cargas de mantenimiento y las fuerzas dinámicas causadas por ráfagas de viento. Para esto, se utiliza un factor de seguridad estructural mínimo de 1.5, recomendado por la NSR-10 y la norma IEC 62548. Además, las estructuras deben ser resistentes a la corrosión y contar con sistemas de fijación certificados.

Se valida que la estructura soporte cargas como:

Carga viento F_v

$$F_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot V^2$$

Donde

$$\rho = \frac{1.225 \text{ kg}}{\text{m}^3} \text{ (densidad del aire)}$$

$$C_d = 1.2 \text{ (coeficiente de arrastre)}$$

$$A = \text{área del panel (m}^2\text{)}$$

$$V^2 = \text{velocidad del viento (} \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{)}$$

Momento de vuelco M_v :

$$M_v = F_v \cdot h$$

donde **h** es la altura desde el punto de apoyo hasta el centro de presión.

Factor de seguridad FS

$$FS = \frac{M_R}{M_U}$$

M_R = momento resistente de la estructura

M_U = momento último aplicado por la carga de viento

Diseño Eléctrico y Electrónico del Sistema Off-Grid

Para el desarrollo del sistema solar fotovoltaico off-grid, se llevó a cabo un análisis energético detallado en tres viviendas representativas ubicadas en la Alta y Media Guajira. A partir de visitas técnicas, encuestas directas a los habitantes y levantamientos de carga, se identificaron los equipos eléctricos utilizados, sus hábitos de consumo y las condiciones particulares de cada instalación. Tras comparar los datos obtenidos, se evidenció una alta simetría en la demanda energética y en los tipos de electrodomésticos instalados, lo que permitió establecer un modelo energético promedio aplicable a un número significativo de viviendas en la región.

Con base en esta homogeneidad, se optó por realizar un cálculo global, con el fin de diseñar un sistema fotovoltaico estándar que optimizara costos, logística de instalación y mantenimiento. Este procedimiento permite replicar el sistema en múltiples viviendas, manteniendo la eficiencia energética y reduciendo la complejidad técnica. Con base a esa información recopilada, aplicamos las diferentes fórmulas matemáticas para calcular las cargas máximas y mínimas requerida.

Cálculo de la Energía Diaria Requerida

$$E_d = \sum_{i=1}^n (P_i \times T_i)$$

La energía total que consumen todos los equipos eléctricos en un día. Multiplica la potencia de cada equipo por sus horas de uso y suma todos los equipos. Esto permite

dimensionar correctamente la generación fotovoltaica necesaria para cubrir la demanda diaria.

Donde

P_i : Potencia del equipo en [W]

T_i : Tiempo de uso diario [h]

n : Numero de equipos

El sistema es 3 kWp. La energía que puede entregar por día (y que, por tanto, cubre la demanda promedio) se calcula aproximando:

Eproducción \approx Potencia instalada \times HSP \times Performance ratio (PR)

- Potencia instalada = 3 kWp = 3000 Wp
- HSP (sitio) = 5.5 h/día, valor típico en el municipio de Barrancas, Guajira
- Performance ratio (pérdidas por temperatura, cableado, inversor, suciedad). Se

Usará **PR = 0.77** (valor típico entre 0.75–0.85).

Cálculo:

$$E_d \approx 3000 \text{ W} \times 5.5 \text{ h} \times 0.77 = 12\,705 \text{ Wh/día} \approx 12.7 \text{ kWh/día}$$

Para un sistema con 3 kWp en La Guajira y PR razonable, esperas ~ 12.7 kWh/día.

Cálculo de la capacidad del banco de baterías

Fórmula dada: $C_b = \frac{E_d \times A}{V_b \times DOD}$ (en Ah)

Donde:

- E_d en Wh/día (usamos 12 705 Wh)
- A = autonomía en días (ej.: 1 o 2 días)
- V_b = voltaje del banco (48 V — muy común en sistemas de 3 kWp off-grid)

- DOD = profundidad máxima de descarga usable (LiFePO4 $\approx 0.8 \rightarrow 80\%$; baterías lead-acid usar 0.5 o menos).

Autonomía 1 día (más común en prototipos), mismas condiciones

$$C_b = \frac{12.705 \times 1}{48 \times 0.8} = 330.9 \text{ Ah} \rightarrow \mathbf{48 \text{ V}, 331 \text{ Ah}} \text{ (~15.9 kWh nominal).}$$

Para sistemas rurales pequeños muchas veces se diseña con 1 día de autonomía y posibilidad de carga durante el día; si se busca resiliencia ante días nublados o demanda extra, elegir 2 días. Ajusta DOD según tipo de batería para prolongar vida útil.

Dimensionamiento del inversor

$$\text{Fórmula: } P_{inv} \geq P_{pico} \times F_s$$

Donde:

- P_{pico} = suma de cargas que pueden funcionar simultáneamente (W)
- F_s = factor de sobredimensionamiento (1.2–1.3) para cubrir picos de arranque y pérdidas.

Cómo estimar P_{pico} : idealmente suma las potencias nominales (P_i) de los equipos que podrían estar ON al mismo tiempo. Si no tienes cargas detalladas, usa la potencia instalada del sistema como referencia de máxima demanda instantánea 3000 W.

Ejemplo (si $P_{pico} = 3000 \text{ W}$)

Con $F_s = 1.25$: $P_{inv} \geq 3000 \times 1.25 = 3750 \text{ W}$.

Seleccionar un inversor $\approx 4 \text{ kW}$ (permite cubrir picos y dejar margen).

Si hay cargas con arranques altos (bombas, motores), considera factor mayor o inversor con sobredimensionamiento/arranque motor aceptable.

4) Número de paneles (N_{pv})

$$\text{Fórmula: } N_{pv} = \frac{E_d \times 1.3}{P_m \times HSP}$$

(1.3 = factor para compensar pérdidas del sistema ~30 %)

- $E_d = 12\,705$ Wh/día
- $HSP = 5.5$ h
- P_m = potencia nominal del panel en Wp (elige modelo)

Paneles grandes LONGI SOLAR 550 Wp

$$N = \frac{16\,516.5}{550 \times 5.5} = \frac{16\,516.5}{3\,025} = 5.46 \rightarrow 6 \text{ paneles de } 550 \text{ Wp.}$$

Protecciones Contra Sobretensión (DPS)

Fórmula simplificada que diste: $t_{cc} \sim I_{sc}/I_{nom}$ — la idea es relacionar corriente de cortocircuito del generador (I_{sc}) con la capacidad nominal del DPS.

Pasos prácticos

1. Estimar la corriente de cortocircuito del arreglo ($I_{sc,arr}$): aproximación rápida

$$I_{sc,arr} \approx \frac{P_{array}}{V_{string_{mp}}} \text{— depende de la configuración (nº de paneles en serie/paralelo).}$$

Ejemplo aproximado: para 3000 W y banco de 48 V, corriente máxima aproximada de entrada $\approx 3000/48 \approx 62.5$ A (valor orientativo).

2. Seleccionar SPD (DPS) cuya corriente nominal y capacidad de descarga soporten picos: se usa factor de seguridad (ej. SPD con $I_n \geq I_{sc} \times 1.25$) y revisar capacidad de descarga (kA) según norma.

3. t_{cc} (tiempo de operación) debe ser lo más bajo posible, se eligen DPS con tiempos de respuesta rápidos.

Regla práctica: dimensiona el SPD para que su intensidad de impulso y corriente nominal cubran los valores máximos del campo PV y la corriente de cortocircuito prevista; además instala DPS tanto en el lado CC (antes del regulador/inversor) como en el lado CA (entrada al tablero).

Selección de Cables (Sección S)

$$\text{Fórmula que das: } S = \frac{2 \times L \times I}{\Delta V \times \gamma}$$

Donde:

- L = longitud del tramo (m)
- I = corriente nominal (A)
- ΔV = caída de tensión permitida (en V) — si usas %: $\Delta V = \% \times V$
- γ = conductividad del cobre (valor adimensional en tu fórmula; usas 56)

Se tendrán predios tipo los cuales manejarán las siguientes medidas:

- Tramo desde banco de paneles hasta controlador/inversor: $L = 10$ m (ida; la fórmula usa ida y vuelta con factor 2)

- Corriente $I \approx 3000 \text{ W} / 48 \text{ V} = 62.5 \text{ A}$
- Caída permitida $\Delta V = 3\%$ de $48 \text{ V} \rightarrow \Delta V = 0.03 \times 48 = 1.44 \text{ V}$
- $\gamma = 56$ (según fórmula aportada)

Cálculo:

$$S = \frac{2 \times 10 \times 62.5}{1.44 \times 56} = \frac{1250}{80.64} = 15.5 \text{ mm}^2$$

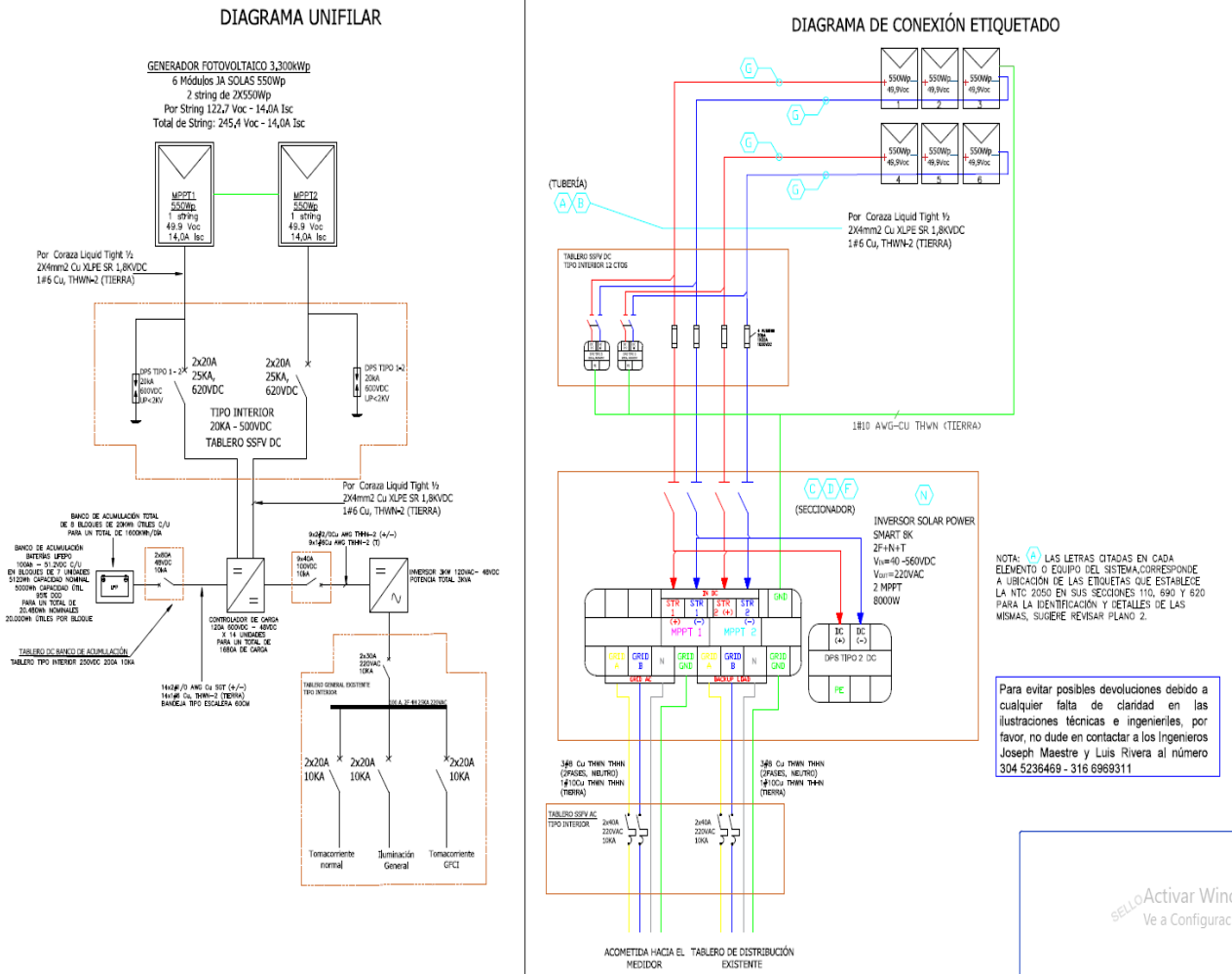
Se Usará conductor comercial $\sim 16 \text{ mm}^2$ (o 16 mm^2 cobre) para mantener caída $\leq 3\%$ en ese tramo de 10 m a 62.5 A .

Plano General Sistema 3.3kWp

El sistema fotovoltaico de 3.3 kWp está conformado por seis módulos solares de 550 Wp organizados en dos strings, cada uno conectado a una entrada MPPT independiente del inversor Smart 8K. La energía generada en corriente continua pasa por protecciones contra sobretensión (DPS tipo 2), interruptores y un seccionador, antes de ingresar al inversor, el cual transforma la energía a corriente alterna a 220 VAC. Esta energía se distribuye a través de un tablero general, protegido con breakers de 20 A para iluminación, tomacorrientes normales y tomacorrientes con GFCI. Además, el sistema incluye un banco de baterías de 48 VDC/10 kWh que permite el almacenamiento energético, garantizando el suministro eléctrico en zonas no interconectadas. Todo el sistema está adecuadamente puesto a tierra y etiquetado siguiendo las normativas RETIE y NTC 2050, asegurando seguridad, eficiencia y trazabilidad en campo.

Figura 2

Diagrama Unifilar y Esquema de Conexión 3kWp.



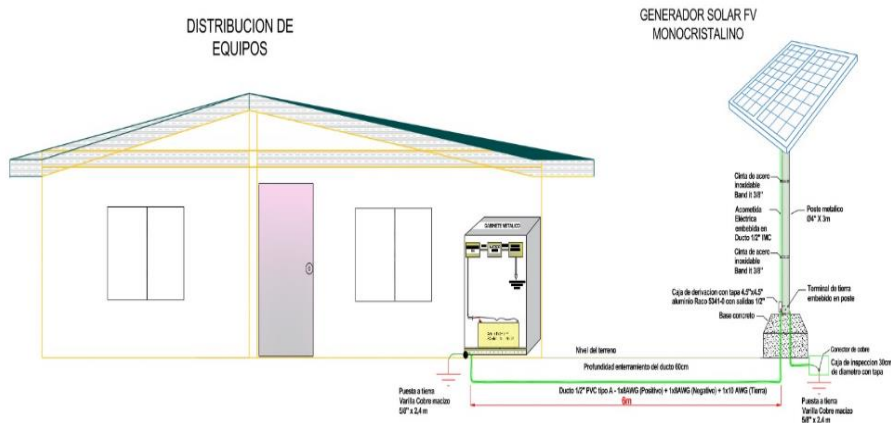
Nota. Elaboración Propia.

Plano General Sistema 2kWp

El sistema fotovoltaico diseñado cuenta con una capacidad instalada de aproximadamente 1,21 kWp, conformado por dos módulos monocristalinos de 605 Wp cada uno, conectados en serie para alcanzar una tensión de operación cercana a 82 V y una corriente de aproximadamente 14,7 A, parámetros adecuados para la operación de controladores MPPT residenciales. Bajo las condiciones de irradiancia promedio en la Alta y Media Guajira, se estima una generación de entre 5 y 6 kWh diarios, suficiente para cubrir necesidades básicas como iluminación, carga de dispositivos de comunicación, refrigeración de alimentos y otros equipos de bajo consumo. El sistema incorpora un banco de baterías a 48 V, dimensionado para garantizar una autonomía mínima de un día entre 6 y 12 kWh útiles según la tecnología seleccionada, así como un inversor híbrido de 2 a 3 kW que asegura la conversión eficiente de energía a corriente alterna. La propuesta contempla también protecciones eléctricas en corriente continua y alterna, puesta a tierra y estructura de soporte adecuada a las condiciones climáticas de la región, lo que garantiza seguridad, sostenibilidad y viabilidad técnica en su implementación para comunidades rurales no interconectadas.

Figura 3

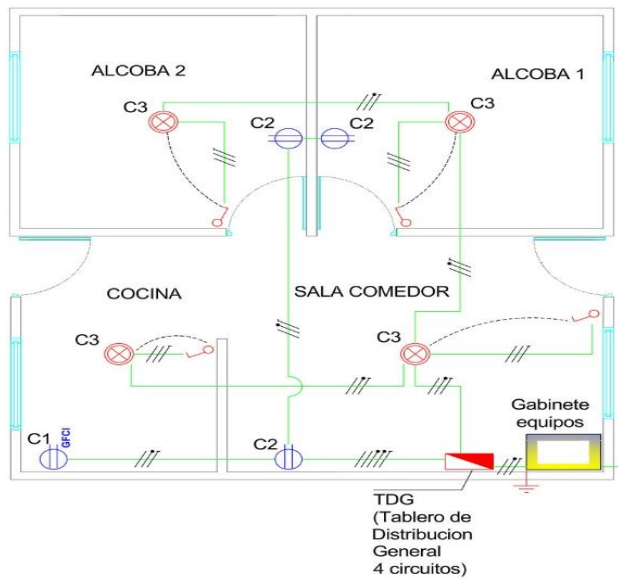
Diseño Detallado de Sistema Autónomo 2kWp.



Nota. Elaboración Propia.

Figura 4

Instalación Interna para la Vivienda.



Nota. Elaboración Propia.

La

Nota. Elaboración Propia.

Figura 4 muestra el diseño eléctrico de las viviendas tipo que conforman el proyecto, donde se representa la distribución de los circuitos eléctricos y los puntos de consumo en cada espacio. Estas viviendas cuentan con una demanda energética reducida, característica de zonas rurales o comunidades con necesidades básicas de electrificación.

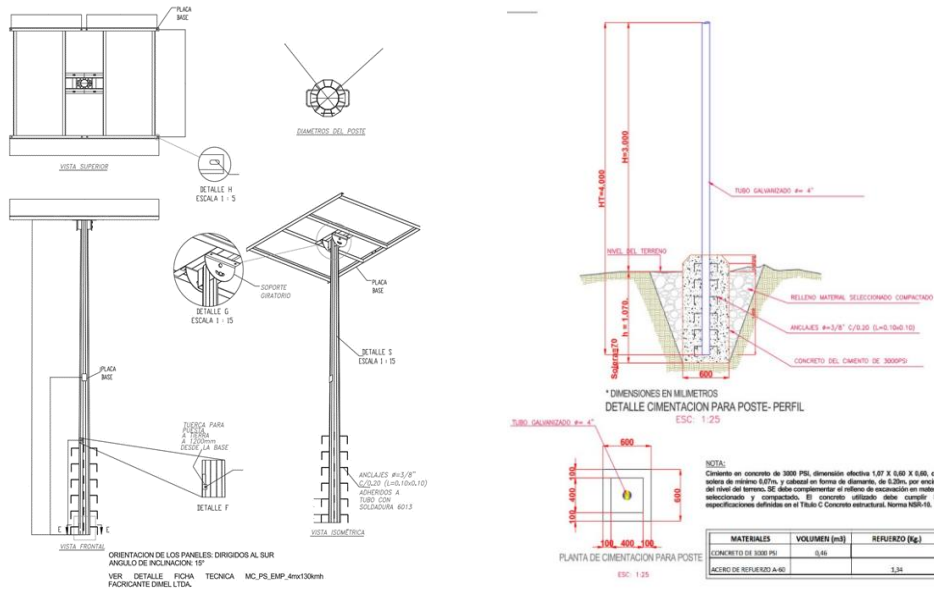
El esquema contempla cuatro ambientes principales: sala-comedor, cocina, alcoba 1 y alcoba 2, cada uno con su respectivo sistema de iluminación y tomas de corriente. La instalación está organizada a partir de un Tablero de Distribución General (TDG) de cuatro circuitos, desde el cual se derivan los alimentadores que suministran energía a los diferentes puntos de uso.

Los circuitos C1, C2 y C3 se distribuyen estratégicamente para garantizar una iluminación adecuada y el funcionamiento seguro de los equipos eléctricos esenciales, respetando las normas de diseño de instalaciones residenciales. Asimismo, se incluye un gabinete de equipos, destinado a alojar los elementos de protección, control y conexión del sistema fotovoltaico, lo que permite una integración eficiente entre la red interna y la fuente de generación solar.

Este diseño busca asegurar una distribución equilibrada de la carga eléctrica, optimizando el uso de la energía disponible y garantizando condiciones de seguridad, confort y funcionalidad para los habitantes de la vivienda tipo.

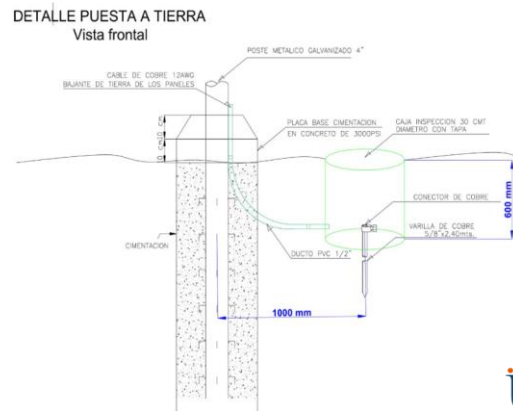
Figura 5

Detalle General de Estructuras y Cimentación.



Detalle de la estructura de sujeción de los paneles, con poste metalico de 3m

Detalle de la cimentación para el poste metalico



Detalle del Sistema de puesta a tierra



Nota. Elaboración Propia.

La estructura propuesta para el sistema fotovoltaico del proyecto se compone de un poste metálico galvanizado de 3 metros de altura, diseñado para soportar el conjunto de módulos solares y garantizar su estabilidad mecánica frente a las condiciones ambientales

características de la región de La Guajira, como la alta radiación solar y los vientos predominantes.

Estructura de Sujeción de los Paneles Solares

El sistema estructural está conformado por un poste principal metálico, anclado al terreno mediante una base de cimentación en concreto reforzado. En su extremo superior se fija una estructura portante o bastidor de perfiles de acero galvanizado, la cual sostiene los módulos fotovoltaicos. Esta estructura permite ajustar la inclinación y orientación de los paneles, asegurando un ángulo óptimo hacia el sur geográfico, con el fin de maximizar la captación de energía solar.

Los elementos de sujeción y anclaje están diseñados bajo criterios de resistencia y durabilidad, utilizando perfiles de acero galvanizado para prevenir la corrosión y prolongar la vida útil del sistema. Además, se contemplan tornillerías y uniones mecánicas que facilitan el mantenimiento y la posible sustitución de los módulos en caso de falla o actualización tecnológica.

Cimentación del Poste Metálico

La cimentación propuesta consiste en una base de concreto simple de 3000 psi, con dimensiones aproximadas de 0.40 m × 0.40 m × 0.90 m, garantizando la estabilidad estructural y evitando el volcamiento del poste ante cargas de viento o peso del conjunto solar. Dentro de esta base se inserta la sección inferior del poste metálico, la cual queda firmemente anclada mediante un relleno de concreto y material seleccionado compactado. Este diseño cumple con las condiciones de soporte necesarias para una estructura de 3 metros de altura, asegurando que las cargas de tracción y flexión sean transmitidas de manera uniforme al terreno. La cimentación se ejecutará conforme a las

especificaciones técnicas y de resistencia de materiales establecidas en las normas de construcción aplicables.

Sistema de Puesta a Tierra

Adicionalmente, la estructura incluye un sistema de puesta a tierra que garantiza la seguridad eléctrica del conjunto. Este sistema está conformado por una varilla de cobre de 5/8" x 2.4 m hincada al terreno, conectada mediante conductor de cobre desnudo calibre #8 AWG al poste metálico y a la estructura portante. Esta conexión permite la disipación de corrientes de falla o descargas atmosféricas, protegiendo los equipos electrónicos del sistema fotovoltaico y evitando riesgos eléctricos para los usuarios.

Plantilla de Cálculos

Posteriormente, se utilizó Microsoft Excel como segunda fase de la metodología para la planificación, organización y formulación de información recopilada de las fuentes. En este paso, se organizó matemáticamente cada una de las ecuaciones utilizadas en el proyecto, lo que facilitó su interpretación y corrección de manera eficaz. Además, nos permitió validar rápidamente los cálculos realizados en el software de simulación PVsyst.


Portada de Inicio en Excel

Para iniciar y organizar los datos en Excel, creamos una portada representativa que muestra a los autores y directores de este significativo proyecto de grado, tal como se detalla en la Figura 3. En esta plantilla se puede navegar con los diferentes botones que indican cada paso a en los que trabajamos de la mano con las comunidades para calcular sus sistemas independientes.

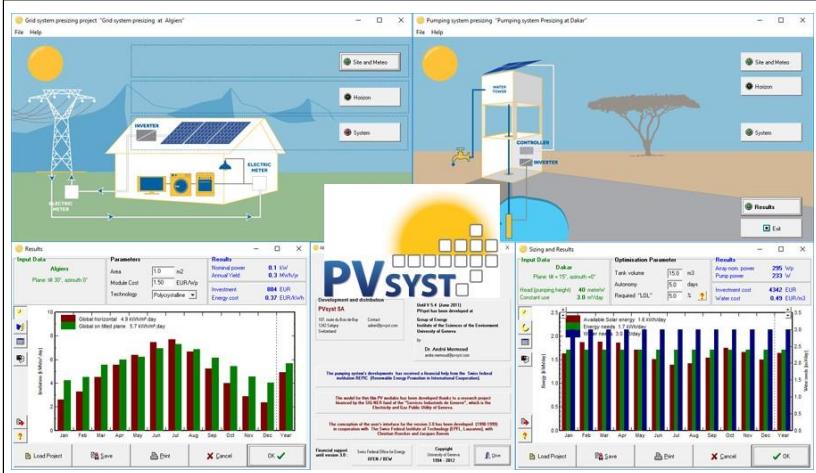
Figura 6.

Plantilla Excel Dedicada al Cálculo de Sistemas Solar.

INGENIERÍA ELECTRÓNICA
RESOLUCIÓN 13155



DISEÑO DE KITS DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS OFF-GRID PARA COMUNIDADES RURALES EN ZONAS NO INTERCONECTADAS DE ALTA Y MEDIA GUAJIRA.



1. DISEÑADOR

JOSEPH GREGORY MAESTRE SALCEDO
1.004.365.082 De Santa Marta, Magdalena
Estudiante Ing. Electrónica

2. DISEÑADOR

LUIS FERNANDO RIVERA PADILLA
1.083.015.684 De Santa Marta, Magdalena
Estudiante Ing. Electrónica

3. DIRECTOR

ING. MGS MAIRA CECILIA GASCA MANTILLA
60.394.753 De Santa Marta, Magdalena
Docente académico

Nota. Elaboración Propia.

En la *Figura 6* desarrollado por los diseñadores funciona como una herramienta de cálculo y simulación técnica para el dimensionamiento de sistemas solares fotovoltaicos off-grid destinados a comunidades rurales sin acceso al sistema interconectado nacional.

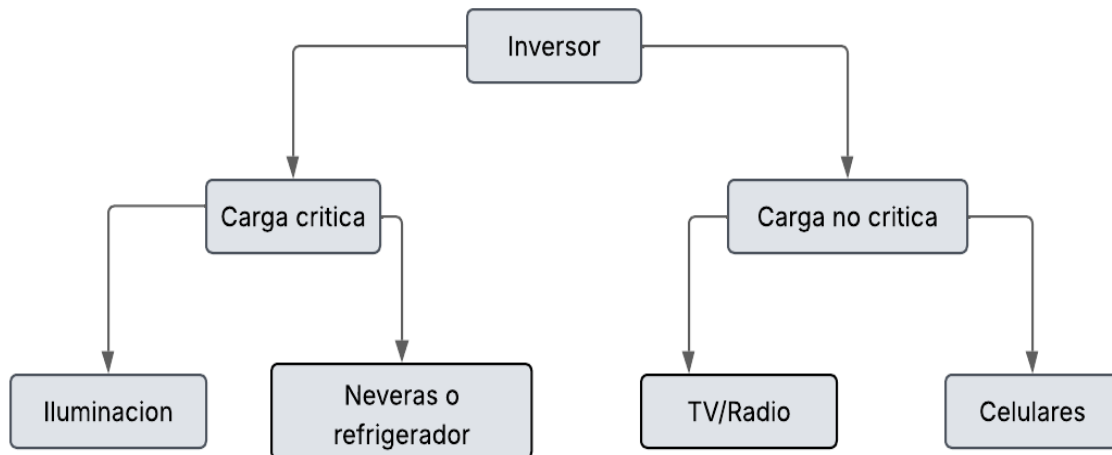
En su estructura, el Excel se encuentra organizado en diferentes hojas o pasos numerados (PASO 1 al PASO 7) que guían al usuario de forma secuencial a través del proceso completo de diseño. Cada paso contiene fórmulas, parámetros técnicos y vínculos automatizados que permiten calcular de manera precisa la potencia requerida, la cantidad de paneles, el tamaño del banco de baterías, la selección del inversor y del controlador de carga, así como la estimación económica del sistema.

El PASO 1 recopila los datos de entrada básicos, como consumo energético diario, irradiancia solar de la zona, número de días de autonomía y tensión de trabajo del sistema. En los pasos intermedios, el archivo realiza el balance energético y eléctrico, determinando la capacidad total del generador fotovoltaico y del sistema de almacenamiento. Finalmente, el PASO 7 consolida los resultados, generando reportes técnicos y gráficos que permiten evaluar la eficiencia y viabilidad del diseño.

El Excel está vinculado con el software PVsyst, como se observa en la portada, lo que permite validar los cálculos teóricos mediante simulaciones profesionales y obtener datos de irradiación, rendimiento y pérdidas del sistema.

Figura 7

Diagrama de Arbol de Cargas Típico para Sistema Fotovoltaico Off-grid.



Nota. Elaboración Propia.

Comparación de Simulaciones

Para garantizar la viabilidad técnica y eficiencia energética del sistema fotovoltaico off-grid diseñado, se llevaron a cabo simulaciones detalladas mediante dos plataformas especializadas: PVsyst y Simulink de MATLAB. Ambas herramientas permiten modelar y analizar el comportamiento de los sistemas solares, pero cada una ofrece distintos niveles de profundidad, visualización y parámetros de análisis.

Simulación en PVsyst

PVsyst permite realizar una simulación completa del sistema solar con base en datos meteorológicos reales, configuración del sistema (paneles, baterías, inversores, pérdidas, inclinación, orientación) y generación estimada de energía. Este software es ampliamente utilizado en el sector para dimensionamiento y predicción de rendimiento a largo plazo.

- Producción anual estimada (kWh/año)
- Pérdidas por temperatura, sombras, cables
- Balance energético
- Autonomía del sistema
- Performance Ratio (PR)

Simulación en Simulink de MATLAB

Simulink permitió realizar una simulación más detallada del comportamiento eléctrico y dinámico del sistema, incluyendo el modelado de los paneles solares mediante bloques equivalentes, el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) con el algoritmo P&O (Perturb and Observe), el inversor DC-AC y el banco de baterías conectado a cargas específicas. Esta simulación permitió observar:

- Ondas de voltaje y corriente en tiempo real
- Respuesta dinámica del MPPT
- Carga y descarga de baterías
- Eficiencia instantánea del inversor
- Protecciones eléctricas simuladas (sobretensión, sobrecorriente)

Comparación de Resultados entre las Simulaciones Realizadas

Ambas herramientas ofrecen validaciones complementarias: PVsyst valida el diseño global, energético y económico. Simulink permite observar el comportamiento dinámico y técnico del sistema en condiciones variables.

La comparación de resultados permitió ajustar parámetros clave como el número de paneles, la capacidad de baterías y la configuración del inversor, logrando una solución

óptima tanto a nivel energético como técnico para las condiciones reales de la región. Esta validación cruzada respalda la confiabilidad del sistema propuesto.

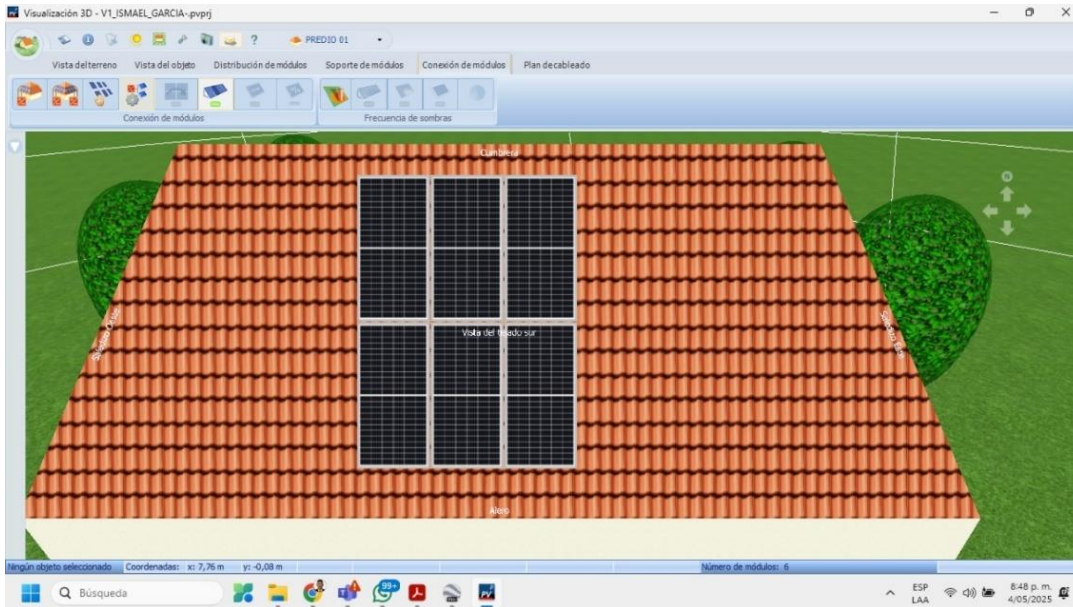
Validación PV*SOL

Con el fin de comprobar la pertinencia técnica de los diseños propuestos, se realizó la validación mediante simulación en el software PV*SOL, herramienta reconocida para el modelado energético de sistemas solares fotovoltaicos. La validación contempló dos escenarios representativos: un sistema de 3.3 kWp, orientado a aplicaciones comunitarias de mayor demanda, y un sistema de 2 kWp, destinado a viviendas rurales individuales. En ambos casos se ingresaron al software los parámetros técnicos de los módulos solares, inversores, controladores de carga y bancos de baterías seleccionados, así como los datos climáticos de irradiancia y temperatura correspondientes a la región de la Alta y Media Guajira.

El proceso de simulación permitió analizar variables como la producción anual de energía, el rendimiento específico **kWh/kWp**, las pérdidas por temperatura y sombreado, la eficiencia global del sistema y el comportamiento del banco de baterías frente a los perfiles de carga establecidos. Esta validación proporciona una aproximación realista del desempeño esperado de los sistemas, garantizando que el dimensionamiento cumpla con las necesidades energéticas locales y se mantenga dentro de parámetros de eficiencia y sostenibilidad.

Figura 8.

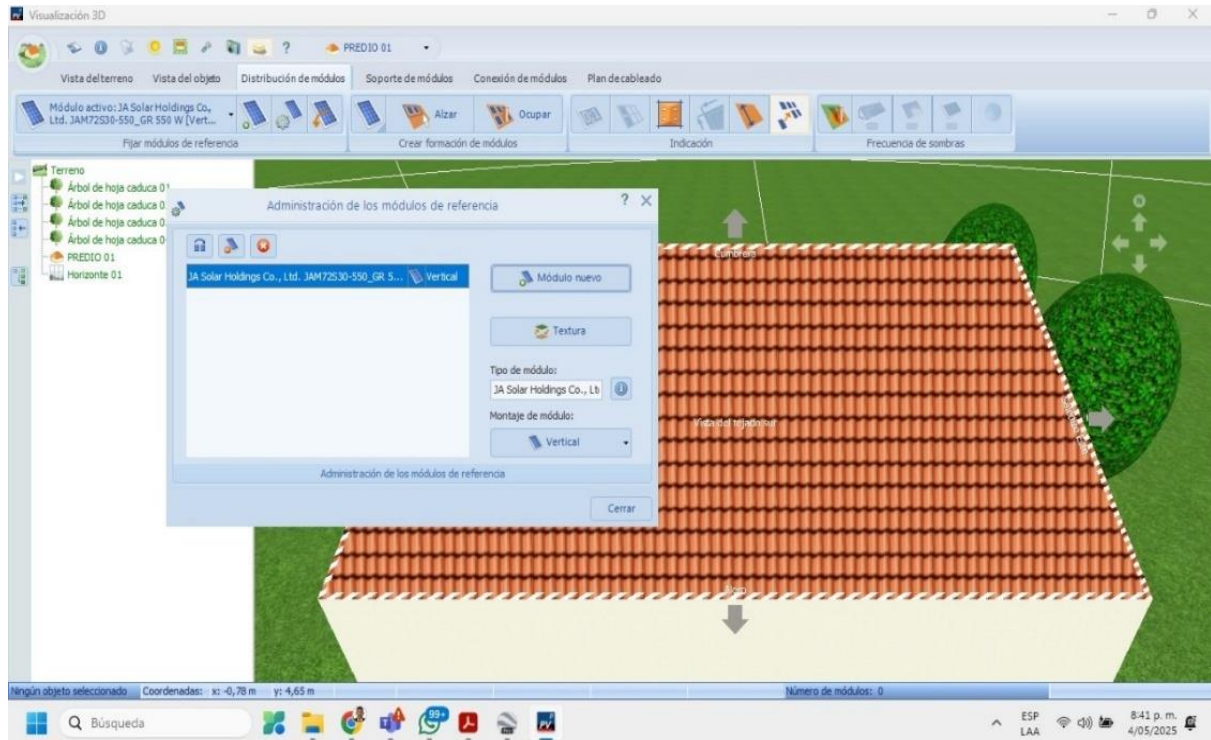
Validación del Sistema de 3.3kwp.



Nota. Elaboración Propia.

En las

Figura 8 y Figura 9 se observa la disposición del sistema solar fotovoltaico instalado sobre la cubierta, así como la conexión entre los diferentes módulos que conforman el arreglo. Estas configuraciones fueron verificadas y validadas mediante el uso del software especializado, en el cual se ingresaron todos los parámetros técnicos necesarios como la orientación, inclinación, irradiancia solar y características eléctricas de los módulos con el fin de garantizar la correcta simulación y desempeño del sistema en las condiciones reales del sitio de instalación.

Figura 9*Verificación de Módulos Seleccionados*

Nota. Elaboración Propia.

Validación SIMULINK-MATLAB

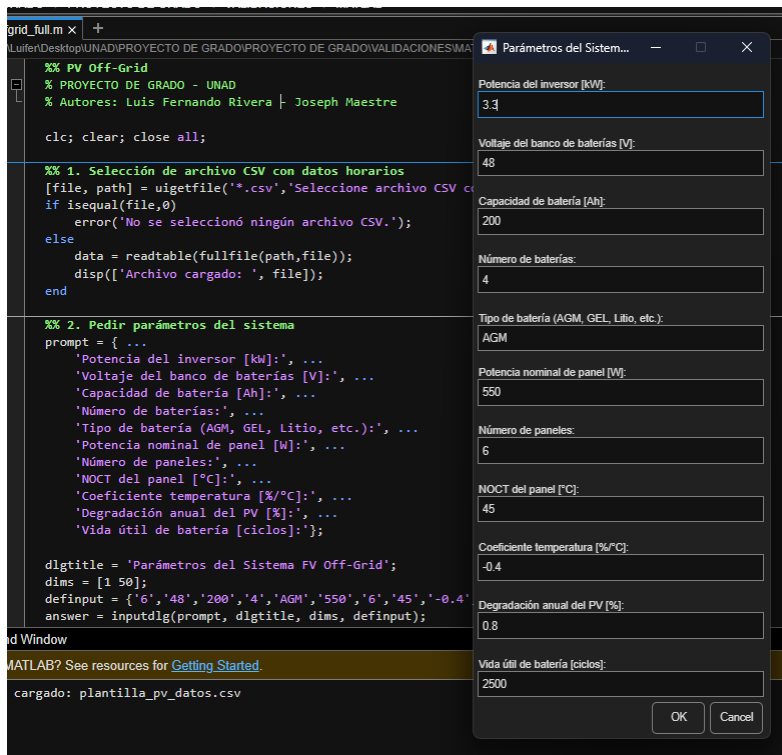
La validación en MATLAB se llevó a cabo mediante el desarrollo de algoritmos que permiten simular de forma horaria el comportamiento de sistemas solares fotovoltaicos autónomos a partir de variables reales de irradiancia, temperatura ambiente y consumo eléctrico. El modelo integra un cálculo térmico simplificado de los módulos mediante el método NOCT y un ajuste por coeficiente de temperatura, lo que permite estimar con mayor realismo la generación energética. Asimismo, se implementó un modelo dinámico de baterías para evaluar el estado de carga, los ciclos equivalentes y la autonomía efectiva

del sistema, junto con la representación de la eficiencia del inversor y la degradación anual de los paneles. A partir de estas simulaciones se determinaron indicadores clave como la expectativa de pérdida de carga LoLE, la probabilidad de pérdida de carga LoLP, el porcentaje de autoconsumo y la cobertura de la demanda, lo que permite validar técnica y metodológicamente la aplicabilidad de los sistemas de 2 kWp y 3.3 kWp en escenarios representativos.

Sistema 3.3kWp

Figura 10

Validación de Parámetros Iniciales en el Aplicativo Matlab.



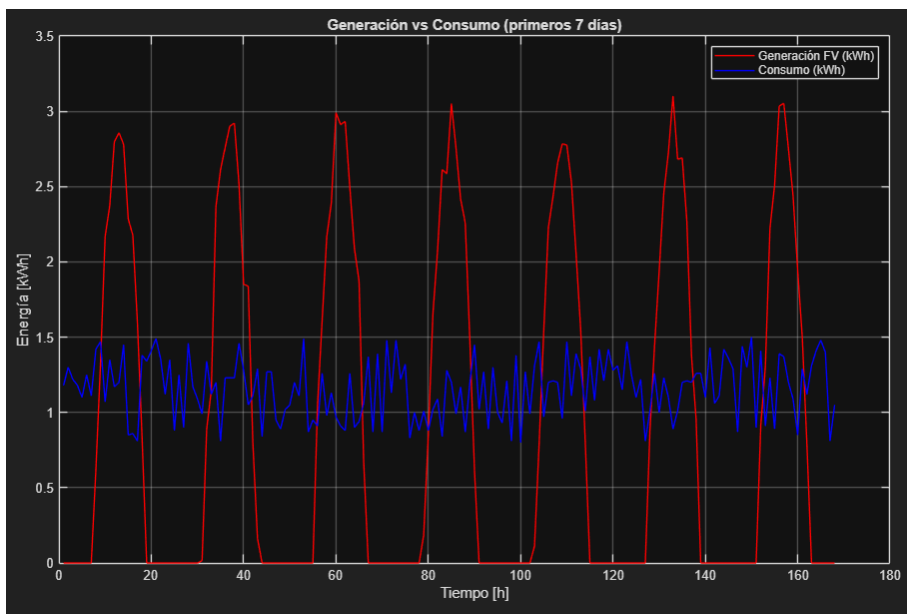
Nota. Elaboración Propia.

En esta figura se muestra el proceso de validación de los parámetros iniciales del sistema fotovoltaico dentro del entorno de programación MATLAB. En esta etapa, se definen e ingresan las variables fundamentales del modelo, tales como la irradiancia solar, la temperatura ambiente, el voltaje y corriente del módulo, la capacidad de la batería, el número de paneles, el tipo de inversor y la potencia total del sistema.

Estos valores son esenciales para el correcto funcionamiento del algoritmo de simulación y permiten establecer las condiciones de operación del sistema Off-Grid, garantizando la coherencia de los datos antes de ejecutar los cálculos de desempeño energético. De esta manera, MATLAB actúa como una herramienta de validación técnica que facilita la verificación, ajuste y análisis de las condiciones iniciales del diseño fotovoltaico.

Figura 11

Validación del Sistema en Respuesta a la Generación y Consumo.



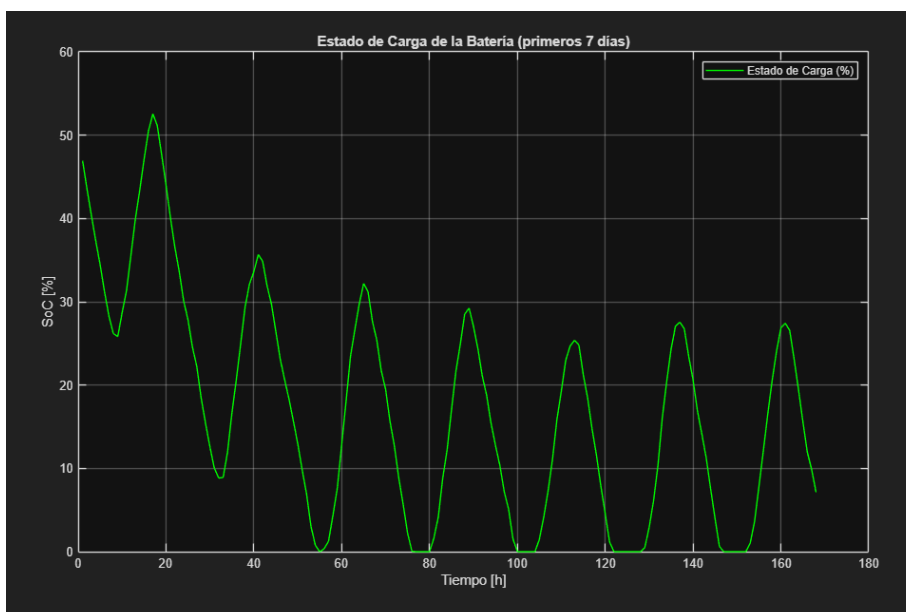
Nota. Elaboración Propia.

En esta Figura 11 se presenta la simulación comparativa entre la energía generada por el sistema fotovoltaico (línea roja) y la energía consumida por la vivienda o prototipo (línea azul) durante los primeros siete días de operación. El análisis permite observar un patrón de generación solar diurna, donde los picos de energía se concentran en las horas de mayor radiación solar, alcanzando valores cercanos a 2,5 kWh diarios. Por otro lado, el consumo presenta un comportamiento más irregular, con variaciones propias de la demanda eléctrica doméstica.

Este resultado confirma que el sistema fotovoltaico propuesto logra satisfacer la demanda energética diaria, generando excedentes durante las horas de mayor insolación, los cuales pueden ser almacenados en el banco de baterías. Dicho comportamiento valida la correcta parametrización del sistema y su capacidad para operar de manera autosuficiente en una red aislada (off-grid).

Figura 12

Estado de Cargas de Baterías, Representada en % y Horas



Nota. Elaboración Propia.

En esta Figura 12 el comportamiento del estado de carga (SOC) del banco de baterías durante el mismo período de simulación. Se evidencia una variación cíclica diaria, donde el nivel de carga disminuye durante la noche debido al consumo sin generación solar y aumenta durante el día conforme los paneles fotovoltaicos suministran energía al sistema.

El SOC alcanza valores máximos cercanos al 50% y mínimos próximos al 10%, lo que demuestra un uso eficiente del almacenamiento, dentro de los márgenes seguros establecidos por el diseño (considerando una profundidad de descarga del 80%).

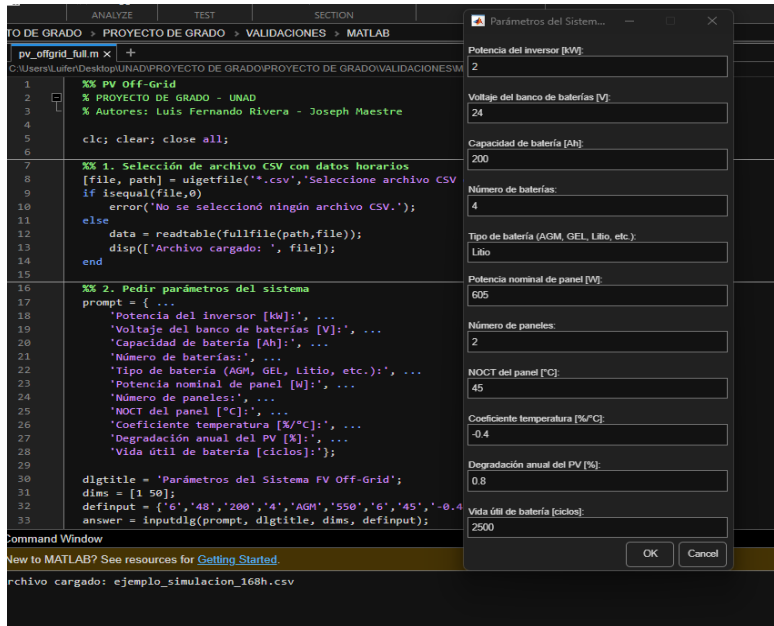
Este comportamiento valida la correcta selección de la capacidad del banco de baterías, asegurando autonomía energética durante las horas sin radiación solar y evitando daños por sobrecarga o sobre descarga.

Sistema 2kWp

se presenta la interfaz de programación desarrollada en MATLAB, utilizada para la validación y simulación del sistema fotovoltaico Off-Grid de 2 kWp diseñado para la comunidad rural seleccionada. En esta etapa se definen los parámetros técnicos iniciales del sistema, entre ellos el voltaje y la capacidad del banco de baterías, la potencia nominal de los módulos solares, el número de paneles, la eficiencia del inversor y los factores de pérdida asociados a temperatura y rendimiento. Estos datos permiten configurar el modelo de simulación que evalúa el comportamiento energético del sistema en condiciones reales de operación, asegurando que la generación estimada sea suficiente para cubrir la demanda prevista de la comunidad.

Figura 13

Validación de Parámetros Iniciales en el Aplicativo Matlab.

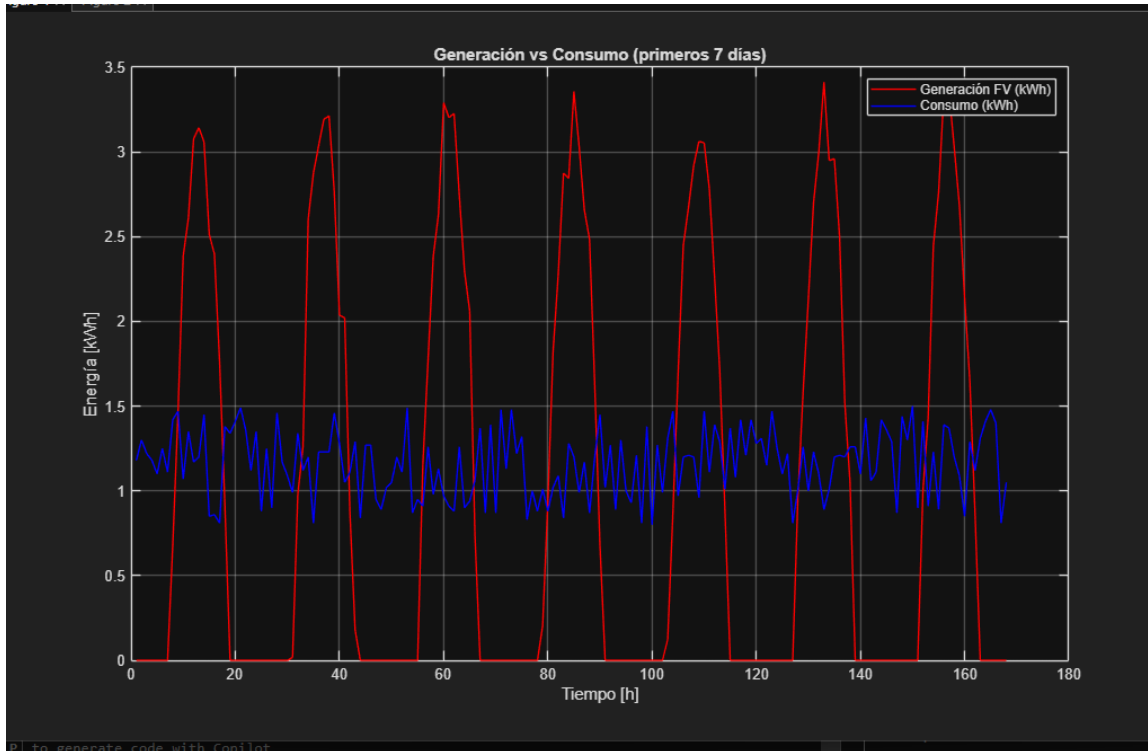


Nota. Elaboración Propia.

En esta figura se presenta la interfaz de programación desarrollada en MATLAB, utilizada para la validación y simulación del sistema fotovoltaico Off-Grid de 2 kWp diseñado para la comunidad rural seleccionada. En esta etapa se definen los parámetros técnicos iniciales del sistema, entre ellos el voltaje y la capacidad del banco de baterías, la potencia nominal de los módulos solares, el número de paneles, la eficiencia del inversor y los factores de pérdida asociados a temperatura y rendimiento. Estos datos permiten configurar el modelo de simulación que evalúa el comportamiento energético del sistema en condiciones reales de operación, asegurando que la generación estimada sea suficiente para cubrir la demanda prevista de la comunidad.

Figura 14

Graficas de Generación Vs Consumo de la Vivienda

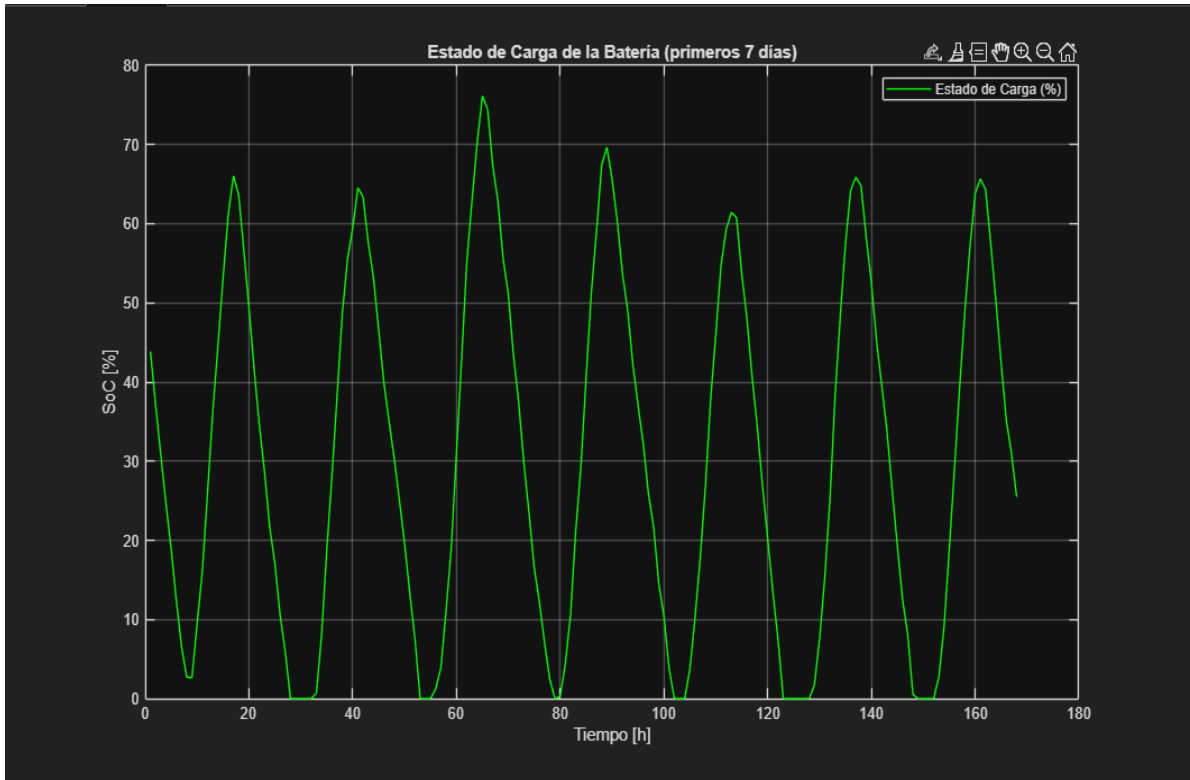


Nota. Elaboración Propia.

La *Figura 14* muestra la evolución del estado de carga (SOC) del banco de baterías a lo largo de la simulación. Se observa un comportamiento cíclico de carga y descarga, donde el sistema recupera su nivel de carga durante el día gracias a la generación solar, y lo reduce durante la noche por efecto del consumo. Este patrón confirma el correcto dimensionamiento del almacenamiento, evidenciando que el sistema es capaz de mantener una operación estable y continua, garantizando energía disponible para los usuarios en todo momento.

Figura 15

Validación de Cargas de Baterías.



Nota. Elaboración Propia.

En la Figura 15 se presenta el comportamiento temporal del estado de carga (SOC) del banco de baterías del sistema fotovoltaico de 2 kWp durante una semana de operación. El gráfico evidencia un patrón cíclico característico de los sistemas solares autónomos, donde las baterías se cargan durante las horas diurnas gracias a la energía proveniente de los módulos fotovoltaicos y se descargan durante la noche al suplir la demanda de las cargas conectadas.

Se observa que el SOC oscila entre valores próximos al 0 % y el 75 %, lo que indica que el sistema aprovecha de manera eficiente la capacidad útil del almacenamiento. Los

picos de carga máxima coinciden con los periodos de mayor irradiancia solar, mientras que los descensos más pronunciados corresponden a las horas nocturnas o de bajo nivel de generación.

El comportamiento alcanzado refleja que el sistema de almacenamiento mantiene un equilibrio energético adecuado entre la generación y el consumo, evitando una descarga completa que pudiera comprometer la vida útil de las baterías. Además, la recurrencia de los ciclos muestra que la energía generada es suficiente para cubrir las necesidades diarias, garantizando autonomía energética y estabilidad operativa.

Desde una perspectiva comunitaria, este resultado representa un impacto positivo al asegurar la continuidad del suministro eléctrico sin depender de la red convencional, promoviendo el uso de energías limpias y sostenibles. La adecuada gestión del estado de carga también contribuye a la confiabilidad del sistema, facilitando el acceso a energía segura y estable en zonas rurales o aisladas.

Conclusiones

El desarrollo del sistema fotovoltaico de 2 kWp demostró la viabilidad técnica de integrar la generación solar y el almacenamiento con baterías para suplir de manera autónoma la demanda eléctrica de una instalación. A través del modelado y simulación en MATLAB, se logró analizar el comportamiento dinámico del sistema ante distintas condiciones de irradiancia y consumo, evidenciando un funcionamiento estable y eficiente. La correcta configuración de los parámetros eléctricos y de control permitió validar la coherencia de los resultados y confirmar que el sistema opera dentro de los rangos óptimos de tensión, potencia y estado de carga.

Los resultados obtenidos de la simulación muestran un equilibrio energético adecuado entre la energía generada por los paneles solares, el consumo diario y la capacidad del banco de baterías. El estado de carga (SoC) se mantuvo dentro de límites seguros, evitando sobrecargas o descargas profundas que podrían afectar la vida útil de los acumuladores. Este comportamiento confirma que el dimensionamiento del sistema tanto en potencia fotovoltaica como en capacidad de almacenamiento fue correctamente establecido, garantizando la autonomía energética y un suministro continuo durante las horas nocturnas o en condiciones de baja radiación solar.

La implementación del sistema solar propuesto representa una alternativa sostenible y ambientalmente responsable, contribuyendo a la reducción de emisiones contaminantes y a la disminución del consumo de fuentes fósiles. Desde el punto de vista social, el proyecto promueve el acceso a energía limpia y confiable, lo que mejora la calidad de vida de la comunidad beneficiada. Además, fomenta la conciencia energética y la adopción de

tecnologías renovables, fortaleciendo la transición hacia un modelo energético más eficiente y resiliente.

El uso de herramientas de simulación y análisis como MATLAB permitió realizar una evaluación integral del sistema, identificando su desempeño realista ante variaciones de carga y condiciones climáticas. La simulación del comportamiento energético a lo largo de varios días facilitó la validación del diseño y el ajuste de parámetros críticos, lo cual reduce riesgos en la etapa de implementación física. Este enfoque de ingeniería basada en simulación evidencia la importancia del uso de software especializado como apoyo en el diseño, optimización y validación de proyectos eléctricos modernos.

Recomendaciones

El sistema requiere un plan de mantenimiento preventivo que incluya la limpieza periódica de los paneles solares, la inspección de conexiones eléctricas, el ajuste de estructuras mecánicas y la verificación del correcto funcionamiento del inversor y las protecciones. Asimismo, se recomienda registrar los valores de voltaje y corriente de las baterías para detectar posibles desequilibrios entre celdas y realizar ecualizaciones cuando sea necesario.

Es aconsejable integrar un sistema de monitoreo remoto que permita supervisar parámetros eléctricos clave como tensión, corriente, potencia, estado de carga (SoC) y temperatura de los componentes. Esto contribuirá a detectar fallos tempranos, optimizar el rendimiento y extender la vida útil de los equipos. Además, el uso de controladores inteligentes (BMS y MPPT avanzados) puede mejorar la eficiencia global del sistema y asegurar una gestión energética más precisa.

Finalmente, se sugiere prever la posibilidad de ampliar el sistema hacia configuraciones híbridas o conectadas a red (On-Grid). Esto facilitaría la inyección de excedentes de energía al sistema eléctrico, optimizando el uso del recurso solar y mejorando el retorno de inversión. Además, se recomienda evaluar la integración de sistemas de respaldo adicionales, como generadores o almacenamiento complementario, para garantizar continuidad del suministro ante condiciones prolongadas de baja radiación.

Referencias Bibliográficas

- ABS Ingenieros. (2000). DLT-CAD.
- Acero, J. C. (2019). Desarrollo de una aplicación en el software Open DSS orientada a la simulación de un sistema de distribución en diferentes escenarios de operación. Bogotá.
- Alonso, V. T. (2012). Simulador Para Cálculos Eléctricos Y Mecánicos De Líneas Aéreas De A.T. Getafe.
- Antonio, S. I. (2006). Programa diseñado para el desarrollo del cálculo eléctrico y mecánico de líneas aéreas de media y baja tensión hasta un nivel de 34,5 kv. Santa Marta: Universidad del Magdalena.
- Energía, M. d. (2013). Reglamento Técnico de instalaciones eléctricas. Bogotá.
- Forero, J. D. (2022). Líneas Eléctricas Aéreas Trenzadas De Baja Tensión. Barranquilla: DE.MA.023.
- Guerrero, D. O. (2019). Manual de interfaz gráfica en Matlab. México.
- Icontec. (2020). Código Eléctrico Colombiano -NTC 2050. Bogotá.
- Ingeniería, E. T. (2022). Especialización en el software PLS-CADD. Madrid.
- Ingenieros, A. (2000). Software de Diseño de Líneas de Distribución y Transmisión de energía eléctrica. Lima.
- Linero, Y. E. (2012). Diseño de redes de distribución eléctrica de media y baja tensión para la normalización del barrio el piñoncito de campo de la cruz. Barranquilla.
- Londoño, T. L. (2001). Diseño, interventoría y costos en el desarrollo de proyectos eléctricos. Cali.

- Medellín, E. P. (2019). Guía técnica: cálculo mecánico de estructuras y elementos de sujeción de equipos. Medellín.
- Minenergía. (2013). Reglamento Técnico de instalaciones eléctricas. Bogotá.
- Santander, E. E. (2020). NTR-01 redes aéreas de media tensión. Bucaramanga.
- Santander, U. T. (2019). Tecnología en Electricidad Industrial. Bucaramanga.
- Tiusabá, J. M. (2017). Subdirección de Energía Eléctrica Grupos de Generación, Transmisión y Convocatorias. Bogotá.
- Otero, B. (2015, 1 octubre). Líneas de Transporte de Energía Luis María Checa - Ed Marcombo.
- Figuerola, A. J. E. (2023, 23 febrero). Guía para el cálculo y la selección de apoyos en estructuras de líneas de transmisión eléctrica.
- Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas – IPSE. (2021). Informe de gestión y resultados. Ministerio de Minas y Energía de Colombia. <https://www.minenergia.gov.co/ipse>
- Ministerio de Minas y Energía. (2024). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE. Resolución 40117 de 2024. <https://www.minenergia.gov.co>
- Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. (2022). Plan Energético Nacional 2022–2050. Ministerio de Minas y Energía. <https://www1.upme.gov.co>
- Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas No Interconectadas – FAZNI. (2023). Proyectos de inversión en energización rural. Ministerio de Minas y Energía de Colombia. <https://www.minenergia.gov.co>

Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas Rurales Interconectadas –
FAER. (2023). Avances en cobertura eléctrica rural. Ministerio de Minas y Energía
de Colombia. <https://www.minenergia.gov.co>

