

Diseño de una solución fotovoltaica para suministro de energía eléctrica para viviendas en la vereda el Rosario del municipio de San Pablo sur de Bolívar

Jorman Andrés Camacho Jiménez y Leyder Andrés Tinjaca Salgado

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Electricista

Director

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga Doctor en Ciencias con Énfasis en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Agradezco a Dios por su infinito amor. por conceder los deseos de mi corazón y por brindarme la inteligencia necesaria para enfrentar cada desafío de mi vida.

A mi madre. Gladis Jiménez Márquez. le dedico estas palabras con profundo amor y gratitud. Ella ha sido mi inspiración constante. mi roca en momentos de dificultad y mi mayor apoyo en cada paso del camino. Sus consejos sabios y su amor incondicional han sido la fuerza motriz que me ha impulsado a superarme día a día. Gracias por siempre brindarme lo mejor. por depositar tu confianza en mí y por creer en mis sueños incluso cuando yo dudaba. Tu presencia en mi vida es un regalo invaluable que atesoro con todo mi ser. Te amo con todo mi corazón y esta dedicación es solo un pequeño gesto de la inmensa gratitud que siento hacia ti.

Jorman Camacho

Dedicatoria

Dedico este trabajo a la memoria de mi amado padre. quien siempre fue mi fuente de inspiración y sabiduría. A pesar de su ausencia física. su legado perdura en cada logro alcanzado.

A mi querida madre. mi roca inquebrantable. cuyo amor y apoyo incondicional han sido mi motor en cada paso de este camino académico.

Leyder Tinjaca

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi familia, especialmente a mi madre, por su amor incondicional y su constante apoyo. Agradezco también a mi novia, por estar siempre a mi lado durante este proceso. Un agradecimiento especial a nuestro director de tesis, por su orientación experta y dedicación.

A todos los que contribuyeron de alguna manera a este trabajo, gracias por su apoyo y colaboración. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

Jorman Camacho

Agradecimientos

Agradecimiento sería poco para todo lo que quiero expresar a mi querida madre, por su amor incondicional, apoyo constante y sabias palabras que me han guiado a lo largo de este camino académico. Gracias por hacer posible este sueño.

A mis hermanos, por su aliento y comprensión en los momentos difíciles, y por celebrar conmigo cada pequeño triunfo.

A mi amado padre, que me enseñó responsabilidad y perseverancia para lograr mis sueños. Aunque ya no esté físicamente conmigo, su presencia sigue siendo palpable en cada uno de mis logros alcanzados. A través de esta tesis, rindo homenaje a su memoria, sabiendo que su legado vive en cada página escrita y en cada palabra pronunciada.

A todos ustedes les dedico este logro, sabiendo que su amor y apoyo han sido fundamentales en mi formación académica y personal.

Leyder Tinjaca

Tabla de Contenido

Introducción.....	10
1. Objetivos.....	13
2.1. Objetivo general.....	13
2.2. Objetivos específicos	13
2. Características Geográficas y Climáticas de la Vereda El Rosario	14
2.1. Características Geográficas y Climáticas de la Vereda El Rosario.....	14
2.2. Características climáticas de la zona.....	15
2.3. Análisis de Datos de Irradiación.....	17
2.4. Normativa de Interés.....	18
3. Caracterización eléctrica e identificación del problema	19
3.1. Demanda energética.....	20
3.2. Curva de Demanda Por Usuario y Totales.	25
3.3. Indicadores de calidad.....	29
4. Alternativas De Soluciones Solares Para La Vereda El Rosario	30
4.1. Alternativa 1: Cubrir la totalidad de la demanda de potencia de la vereda durante el día con una Comunidad Energética que realice Generación Distribuida Colectiva. con un nuevo transformador sin baterías.....	32
4.2. Alternativa 2: Cubrir el 100% de la demanda con una Comunidad Energética que realiza Generación Distribuida Comunitaria con un nuevo transformador e incluir baterías.....	36

4.3.	Alternativa 3: Cubrir el 100% de la demanda energética de la vereda con un Sistema Híbrido Offgrid con transferencia energética y almacenamiento aplicado individualmente por vivienda.....	41
4.4.	Alternativa 4: Sistema de Microred Ongrid con Almacenamiento aplicado individualmente por vivienda.....	44
4.5.	Alternativa 5: Sistemas Ongrid sin almacenamiento aplicados individualmente por vivienda.....	48
5.	Resumen de propuestas de solución	51
5.1.	Descripción de la propuesta técnica y económica seleccionada.....	54
6.	Conclusiones	57
	Referencias	59

Lista de Tablas

Tabla 1 Fotografía de Electrodomesticos de Viviendas	21
Tabla 2 Análisis de Demanda Energética de la Comunidad.....	24
Tabla 3 Presupuesto para la Alternativa 1 del proyecto solar fotovoltaico comunitario.	34
Tabla 4 Presupuesto para la Alternativa 2 del proyecto solar fotovoltaico comunitario.	39
Tabla 5 Presupuesto para la Alternativa 3 del proyecto solar fotovoltaico comunitario.	43
Tabla 6 Presupuesto para la Alternativa 4 del proyecto solar fotovoltaico comunitario.	46
Tabla 7 Presupuesto para la Alternativa 5 del proyecto solar fotovoltaico comunitario.	50
Tabla 8 Resumen de Propuestas	54

Lista de Figuras

Figura 1 Transformador Existente	14
Figura 2 Panorámica aérea - Vereda el Rosario	15
Figura 3 Horas de Brillo Solar	16
Figura 4 Curva de Irradiación Promedio Anual en la Zona.....	18
Figura 5 Histórico de Demanda por día y Respektivas Horas. Vereda el Rosario - Por Usuario	27
Figura 6 Curva de la demanda total en la vereda el rosario.....	28
Figura 7 Interrupciones del servicio por horas.....	29
Figura 8 Frecuencia de Eventos (Interrupciones)	30

Resumen

Título: Diseño de una solución fotovoltaica para suministro de energía eléctrica para viviendas en la vereda El Rosario del municipio de San Pablo Sur de Bolívar*

Autores: Jorman Andres Camacho Jimenez y Leyder Andres Tinjaca Salgado**

Palabras Clave: Sistema fotovoltaico, sistemas híbridos offgrid, sistemas ongrid, microredes, sostenibilidad, energía limpia.

Descripción

El presente trabajo de grado se enfoca en el diseño e implementación de una solución fotovoltaica que permita suministrar energía eléctrica a las viviendas ubicadas en la vereda El Rosario, en el municipio de San Pablo, Sur de Bolívar. La comunidad enfrenta dificultades en el acceso a la energía debido a su ubicación geográfica y la falta de infraestructura eléctrica convencional. Para abordar este problema, se evaluaron múltiples alternativas técnicas y económicas con el objetivo de proporcionar un suministro energético sostenible y fiable.

Las alternativas seleccionadas después de un análisis exhaustivo incluyen sistemas híbridos offgrid con almacenamiento de energía, sistemas ongrid y microredes con almacenamiento, todos diseñados de manera individual para cada vivienda de la vereda. Estas opciones no solo permiten cubrir la demanda energética actual de la comunidad, sino que también ofrecen flexibilidad y escalabilidad para futuras necesidades. La implementación de cualquiera de estas alternativas contribuirá a mejorar significativamente la calidad de vida de los habitantes, al proporcionar una fuente de energía limpia, constante y adaptada a las particularidades de la región.

* Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones - E3T. Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga Doctor en Ciencias con Énfasis en Ingeniería Eléctrica

Abstract

Title: Design of a Photovoltaic Solution for the Supply of Electrical Energy to Homes in the El Rosario District of San Pablo, Sur de Bolívar*

Authors: Jorman Andrés Camacho Jiménez y Leyder Andres Tinjaca Salgado**

Keywords: Photovoltaic system, hybrid off-grid systems, on-grid systems, microgrids, sustainability, clean energy.

Description

This thesis focuses on the design and implementation of a photovoltaic solution to supply electricity to homes in the El Rosario district of San Pablo, Sur de Bolívar. The community faces challenges in accessing electricity due to its geographic location and the lack of conventional electrical infrastructure. To address this issue, multiple technical and economic alternatives were evaluated with the aim of providing a sustainable and reliable energy supply.

The selected alternatives, after thorough analysis, include hybrid off-grid systems with energy storage, on-grid systems, and microgrids with storage, all individually designed for each household in the village. These options not only meet the current energy demand of the community but also offer flexibility and scalability for future needs. Implementing any of these alternatives will significantly improve the quality of life for the residents by providing a clean, consistent energy source tailored to the region's specific conditions.

*Degree work

**Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunication Engineering -E3T. Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga Doctor of Science with Emphasis in Electrical Engineering

Introducción

En este trabajo de grado, se presenta el diseño de un sistema fotovoltaico que entrega energía eléctrica a las viviendas de una comunidad rural, eliminando la dependencia de combustibles fósiles y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Imagine vivir en un lugar donde el acceso a la electricidad es limitado y costoso. Imagine cómo podría mejorar su vida si tuviera una fuente confiable y sostenible de energía eléctrica. Nos enfocaremos en cómo la tecnología fotovoltaica puede proporcionar una solución para este problema en la vereda del Rosario, un lugar ubicado en el municipio de San Pablo, al sur de Bolívar, en Colombia.

El primer gran descubrimiento de la humanidad fue el fuego, pues gracias a este cambió la manera en que se alimentaban las personas y vivían las comunidades, en parte porque la luz en las noches sumó horas productivas a las comunidades. Así mismo, miles de años después hubo una revolución similar cuando se descubrió la energía eléctrica y se crearon los bombillos eléctricos y muchas otras máquinas que caracterizan la vida moderna. Hoy en día no se concibe una civilización avanzada en la Tierra sin un gran consumo de energía eléctrica.

Sin embargo, en el siglo XXI aún existen muchas comunidades que no tienen satisfecha su necesidad de energía eléctrica. Según la Organización de Naciones Unidas (ONU) [1] 733 millones de personas no tienen acceso a electricidad alrededor del mundo, lo que representa casi un 10% de la población del planeta. En Colombia, el 97% de la población tiene acceso a electricidad en su hogar, lo que deja a 400.000 familias sin acceso a este recurso, la gran mayoría en entornos rurales, en donde la cobertura es de solo el 86% [2].

La matriz energética mundial ha sido históricamente contaminante, es por ello que el séptimo Objetivo de Desarrollo Sostenible de la ONU es *Energía asequible y no contaminante*, lo que indica que se busca un acceso universal a la electricidad, y que, además, la producción de

dicha energía se realice con métodos amigables con el medio ambiente. Actualmente, del total de la energía eléctrica producida a nivel mundial el 30% se genera con recursos renovables [1]. Otro reto mayúsculo se presenta en la disminución del uso de combustibles fósiles para el transporte, aunque en la última década se han iniciado proyectos que comienzan a electrificar el parque automotor a nivel mundial.

En Colombia, el 68% de la potencia instalada es renovable, aunque la energía generada con recursos renovables fue 85% del consumo del país en el año 2022 [3], siendo el resto de la energía generada con fuentes térmicas. Sin embargo, estas cifras son altas dado que la mayoría de la matriz energética del país depende de recursos hídricos, es decir, es energía renovable convencional. La tendencia mundial es hacia la instalación de proyectos con recursos energéticos renovables no convencionales.

Los últimos gobiernos del país, incluido el actual, han formalizado y actualizado las normativas para proyectos energéticos de energías renovables no convencionales en diferentes escalas y han facilitado legislativamente la penetración de las energías renovables en el país. La norma por la que se rigen estos proyectos en el país es la Resolución CREG 174 de 2021, que es similar a otras normativas de la región y del mundo, por lo que podría decirse que, en términos generales, es una buena ley y cumple las necesidades actuales del país. Esta fue una actualización a la primera versión de la normativa para energías renovables no convencionales, que fue la Resolución CREG 030 de 2018. La CREG 174 indica los estándares técnicos y comerciales que deben cumplir los proyectos, en cumplimiento de la Ley 1715 de 2014 del Senado de la República, que *“tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional”* [4].

La principal necesidad que se presenta en la comunidad de la vereda es la inexistencia de un sistema de energía eléctrica de respaldo ante los constantes cortes de dicho servicio. Al finalizar este proyecto, se entregará un diseño eficiente y confiable de un sistema de paneles fotovoltaicos capaz de abastecer los electrodomésticos más necesarios de los 90 hogares de la vereda. A través de la investigación y análisis, demostraremos cómo el uso de la energía solar fotovoltaica puede aumentar significativamente el acceso a la electricidad, mejorar la calidad de vida de las personas en áreas rurales y contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Este documento contiene, en primer lugar, los objetivos establecidos para este proyecto; seguido de una descripción de la geográfica y climática de la zona en la que habita la comunidad en la que se implementaría el proyecto para contextualizar al lector; luego una sección explica la normativa que aplica para este tipo de proyectos en Colombia; posteriormente se realiza una caracterización eléctrica de la comunidad; para continuar con las dos secciones más importantes del proyecto, que son las diferentes alternativas de diseño que se proponen para el proyecto, con una descripción de los equipos necesarios para cada alternativa y un presupuesto económico; mientras en la siguiente sección se detalla con mayor profundidad técnica el diseño eléctrico para la alternativa seleccionada como más idónea para cumplir los objetivos planteados entre opciones las presentadas. Finalmente se entregan las conclusiones del proyecto, y en los anexos se encuentra información relevante para el desarrollo de este documento, resaltando la Memoria de Cálculos que hace parte del diseño específico de la alternativa seleccionada.

1. Objetivos

2.1.Objetivo general

Diseñar una solución fotovoltaica para el suministro de energía eléctrica en viviendas de la vereda El Rosario del municipio de San Pablo. Bolívar.

2.2.Objetivos específicos

Identificar las características de la carga eléctrica de las viviendas y su distribución espacial acorde con la topografía de la vereda.

Formular alternativas para el suministro de energía eléctrica a las viviendas de la vereda mediante sistemas fotovoltaicos.

Seleccionar la mejor alternativa partiendo de su evaluación técnica. legal y financiera.

Elaborar el diseño detallado de la alternativa seleccionada. lo cual incluye memorias de cálculo. planos y presupuestos de inversión.

2. Características Geográficas y Climáticas de la Vereda El Rosario

2.1. Características Geográficas y Climáticas de la Vereda El Rosario

La vereda El Rosario se encuentra ubicada en el área rural del municipio de San Pablo, Bolívar, con coordenadas geográficas 7.627240, -73.876135. Consta de aproximadamente 90 casas familiares, las cuales están todas alimentadas por un transformador eléctrico de 30 kVA de potencia. Las viviendas están situadas unas cercanas a las otras, y existe servicio de energía eléctrica para todas las casas, indicando que la red de distribución eléctrica es existente y se encuentra funcionando, pero advirtiéndose además que la constancia del servicio varía, ocasionando lapsos de cese en la prestación del servicio.

El terreno de la vereda es llano, lo que significa que las variaciones de altura entre una zona y otra son casi inexistentes. No existen montañas cercanas ni edificios altos, por lo cual no habrá problemas de sombras para el proyecto solar en la zona.

Figura 1

Transformador Existente



Nota: Tomada in situ. autoría propia.

En la siguiente fotografía se puede observar que las viviendas se encuentran unas cercanas a las otras. Se sabe además que existe servicio de energía eléctrica para todas las casas. de modo que la red de distribución eléctrica es existente y se encuentra en un estado funcional.

Figura 2

Panorámica aérea - Vereda el Rosario



Nota: Fotografía Satelital de la Vereda el Rosario. Tomada de Google earth.

2.2. Características climáticas de la zona

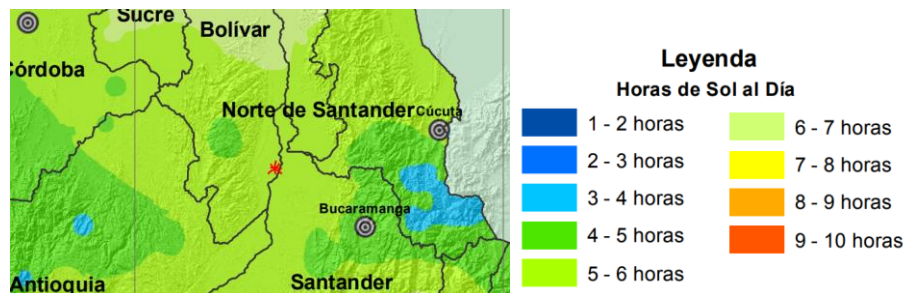
La región Caribe de Colombia, donde se encuentra la vereda El Rosario, es la zona geográfica con mayor potencial de energías renovables en el país. Aunque no tiene mucha industria petrolera, concentra gran parte de las reservas y producción de carbón. En los últimos años, el auge de las energías renovables ha despertado el interés de los inversores y el gobierno nacional. En términos de energía solar, estos proyectos traen beneficios sociales significativos a la región, como la generación de empleo para la mano de obra local durante la ejecución, operación y mantenimiento de los proyectos, cuya vida útil supera los 20 años.

Además de los beneficios sociales, los proyectos solares evitan el uso de otras fuentes de generación de energía que contaminan el aire, mejorando la salud de los habitantes. Esto es particularmente relevante, ya que muchas familias utilizan motores de combustión para suplir sus necesidades eléctricas durante fallas en el servicio de energía, lo que también impacta su economía por el costo del combustible.

El Mapa de brillo solar del IDEAM muestra que la región promedia más de 5 horas de sol diarias a lo largo del año, debido a su proximidad al ecuador terrestre, lo que la hace ideal para proyectos con paneles solares, generando más energía que en muchas otras partes del mundo.

Figura 3

Horas de Brillo Solar



Nota: Mapa de brillo solar en la región. Recuperado de IDEAM.

82.1% y el 56.7% respectivamente de estas áreas útiles, se podría cubrir la demanda de energía eléctrica de estas ciudades. (p. 11) Aunque también se da claridad en el mismo documento que esto es un escenario irreal, por lo que lo ideal es generar la energía con un mix de tecnologías. Este dato nos sirve para dimensionar el potencial energético de la región.

Al momento de pensar en un proyecto solar, se deben evaluar, además de aspectos como la viabilidad financiera del proyecto o los equipos a utilizar, otros temas de contexto como la geografía en la cual se va a realizar la implantación, si hay terrenos planos, si se va a poner en los

techos de las construcciones. si hay sombras por árboles o edificios. entre otros. Así mismo. se debe revisar la climatología. pues de esta depende la cantidad de horas de Sol disponibles a lo largo del año en la zona y si el proyecto es viable.

2.3.Análisis de Datos de Irradiación

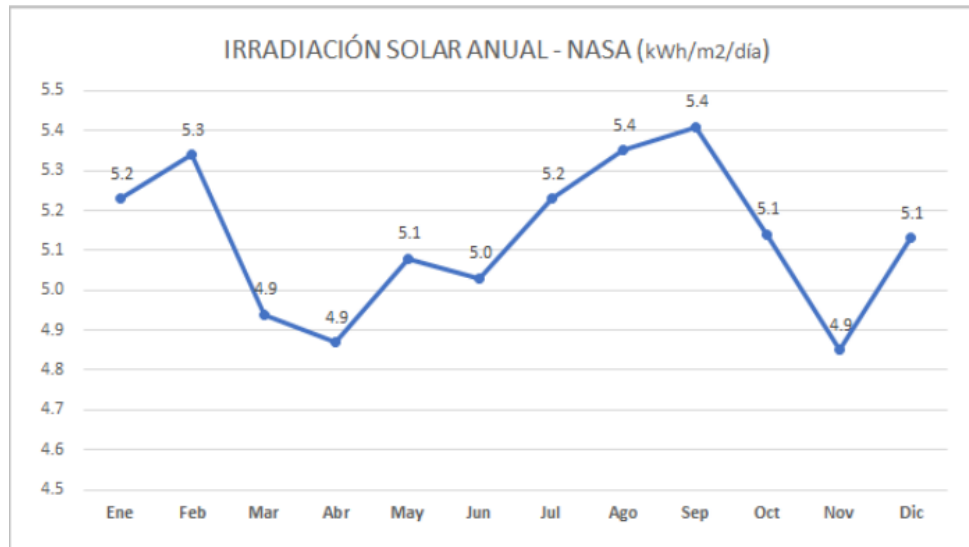
La región Caribe de Colombia. con su clima cálido y soleado. tiene un gran potencial para la energía solar. Datos de la NASA muestran que la irradiación solar anual promedia 4.9 kW/m²/día. Esto la convierte en una zona ideal para proyectos de energía solar.

Los beneficios son claros: se crean empleos locales durante la instalación y mantenimiento de los proyectos. y se mejora la calidad del aire al reducir el uso de fuentes de energía contaminantes. Además. las familias pueden ahorrar en costos de combustible al depender menos de generadores de combustión.

El Mapa de brillo solar del IDEAM confirma que la región recibe más de 5 horas de sol diarias en promedio. lo que asegura una producción eficiente de energía solar. Con estos datos. la región Caribe se posiciona como un punto estratégico para el desarrollo de la energía solar en Colombia.

Figura 4

Curva de Irradiación Promedio Anual en la Zona



Nota: Elaboración Propia. Basado en datos de la NASA.

2.4. Normativa de Interés

En Colombia, cualquier proyecto eléctrico se rige por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), que describe las pautas que deben seguir ingenieros y técnicos al realizar instalaciones eléctricas. La versión vigente es la publicada el 30 de agosto de 2013, con sus posteriores modificaciones.

Para proyectos fotovoltaicos, la normativa colombiana nace con la Ley 1715 de 2014, que regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Esta ley solicita a la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) establecer parámetros técnicos y comerciales para regular estos proyectos. La Resolución CREG 030 de 2018, reemplazada por la Resolución CREG 174 de 2021, establece los procedimientos y

responsabilidades de los actores involucrados en la instalación de proyectos solares y las tarifas para la compraventa de energía.

Otra norma relevante es la Ley 143 de 1994, que establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en Colombia. El Decreto 2236 de 2023 del Ministerio de Minas y Energía, reglamenta parcialmente la Ley 2294 de 2023 del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, definiendo las Comunidades Energéticas y la Autogeneración colectiva.

El consumo de subsistencia es definido por la Resolución UPME 355 de 2004 como la cantidad mínima de electricidad utilizada en un mes por un usuario típico para satisfacer necesidades básicas. Se establece en 173 kWh-mes para alturas inferiores a 1.000 metros sobre el nivel del mar, y 130 kWh-mes para alturas iguales o superiores. Para este proyecto, el consumo de subsistencia es de 173 kWh-mes por cada casa, ya que la Vereda El Rosario se encuentra a una altura menor a 1.000 metros sobre el nivel del mar.

3. Caracterización eléctrica e identificación del problema

Los habitantes de la vereda del Rosario siempre han tenido una problemática con la intermitencia del flujo de la energía eléctrica. Esto se debe al difícil acceso a la zona por parte de los comercializadores de energía, por lo que el sistema no está en óptimas condiciones para prestar un servicio eficaz y confiable.

Al ser una zona rural, la línea de transmisión eléctrica que lleva la energía a la vereda recurrentemente es dañada por caídas de árboles, sobre todo, en época de invierno. En otros casos, los daños son causados por personas malintencionadas, ya que en esa zona hay presencia de

guerrillas y grupos al margen de la ley. los cuales dañan las redes eléctricas cuando hay conflictos con otros grupos armados.

Hace aproximadamente una década. los habitantes han optado por adquirir plantas de generación de energía eléctrica a base de combustibles fósiles para suplir la demanda de los electrodomésticos más esenciales (bombillos. nevera. enfriadores. etc.). Sin embargo. esta práctica ha generado contaminación en el aire por las emisiones de dióxido de carbono de las plantas generadoras y contaminación acústica por los altos ruidos ocasionados en el proceso de combustión. En los últimos años. el precio de los combustibles se ha elevado considerablemente. a tal punto que muchos habitantes no pueden comprar suficiente combustible para el tiempo necesario de uso de la planta generadora.

Por lo explicado anteriormente. se buscan alternativas eficientes. confiables y amigables con el medio ambiente. Por la topografía de la vereda. inicialmente se tenían dos opciones para resolver dicha problemática: generación eólica y generación fotovoltaica. La velocidad promedio del viento en esa zona no es lo suficientemente alta como para que un sistema de aerogeneradores trabaje de manera óptima. por lo que se descartó esta solución. La instalación de paneles fotovoltaicos es la solución más eficiente ya que. gracias a la geolocalización de la vereda. la radiación solar es alta durante casi todo el año. La ausencia de edificaciones de más de dos pisos también facilita la captación de la radiación solar durante todo el día.

3.1.Demanda energética

La mayoría de las casas tienen electrodomésticos básicos. como son bombillos. televisor. nevera. celulares y computador portátil. Sin embargo. los consumos mensuales son bajos. dado que el servicio es intermitente. El consumo mensual suele ser menor a 120 kWh mensuales por

cada casa. según los datos que se muestran a continuación. los cuales fueron tomados de viviendas reales de la vereda.

Dado que es posible que los consumos reales de las viviendas están distorsionados por la recurrente interrupción del servicio de energía. posiblemente los consumos con servicio continuo de energía sean mayores y el *Consumo de subsistencia* hace sentido para los cálculos. Así. en adelante. los cálculos se realizarán considerando el consumo de subsistencia

mínimo vital de energía eléctrica dado por el gobierno nacional. es decir. 173 kWh mensuales de consumo por cada vivienda. Esta cifra es lo que considera el gobierno nacional que es lo mínimo que requiere una familia de 4 personas para sobrevivir un mes. Además. sin considerar locales comerciales. solo viviendas familiares.

Para calcular la demanda energética del proyecto se calcula la energía consumida por la vereda en un mes. Considerando que existen 90 casas de familia el cálculo es el siguiente:

$$\text{Demanda energética} = \text{Cantidad de casas} * \text{Consumo de subsistencia}$$

$$\text{Demanda energética} = 90 * 173.1 \text{ kWh} - \text{mes} = 15.579 \text{ kWh} - \text{mes}$$

Así mismo. se realizará un pequeño análisis de la potencia instalada de electrodomésticos en la vereda. Para ello. se tiene evidencia fotográfica de los electrodomésticos de algunas viviendas.

Tabla 1

Fotografía de Electrodomesticos de Viviendas

Electrodomésticos	Fotografías
-------------------	-------------

Vivienda 1 Televisor



Vivienda 1 Lavadora Manual



Vivienda 1 Nevera



Vivienda 2 Nevera



Vivienda 2 Televisor



Vivienda 2 Ventilador (techo)



Vivienda 2 Licuadora



Nota: Fotografías en cada vivienda. Elaboración Propia.

Como se puede observar en las imágenes anteriores. cada vivienda tiene electrodomésticos normales de una vivienda en tierra caliente. aunque sin aires acondicionados. Teniendo en cuenta lo anterior. se hará una aproximación de la potencia instalada en cada vivienda. También se hace una aproximación de la cantidad de horas de uso que tendría cada electrodoméstico de modo que en una familia se consuman 173 kWh-mes. El resultado de estos ejercicios se muestra en la tabla a continuación:

Tabla 2

Análisis de Demanda Energética de la Comunidad

Electrodoméstico	Potencia [W]	Cantidad	Horas de uso mensuales [h/mes]	Consumo energético [kWh/mes]
------------------	-----------------	----------	---	------------------------------------

Televisor	300	1	45	13.5
Ventilador	100	2	240	48
Nevera	350	1	300	105
Bombillos	30	2	90	5.4
Celular	20	2	30	1.2
Total familia	800			173.1
Total comunidad	72.000			15.579

Nota: Datos extraídos de las mediciones en cada vivienda. Elaboración Propia.

Analizando la tabla se puede observar que la potencia total de los electrodomésticos de la comunidad puede superar los 72 kW. El transformador existente es de 30 kVA. es decir que solo tiene capacidad de cubrir un 41.7% de esta potencia. Para saber si es suficiente o no. se debe tener en cuenta el factor de simultaneidad. que indica el porcentaje de potencia instalada que se puede requerir en un instante de máximo consumo comunitario. y es una estimación que se realiza en el momento del diseño.

En el proyecto de tesis “Metodología para el cálculo de factores de simultaneidad y demanda” de Fiorella Robles [9]. concluye que un factor de simultaneidad adecuado para un proyecto de viviendas multifamiliares de entre 51 y 200 familias es de 0.3. En otras palabras. es adecuado diseñar suponiendo que la comunidad no va a requerir más del 30% de su potencia instalada. por lo que el transformador existente es suficiente para suplir la demanda de potencia de la comunidad. El 30% de la potencia calculada de la comunidad es 21.6 kW. por lo que el transformador tiene un sobrante de 8.4 kVA.

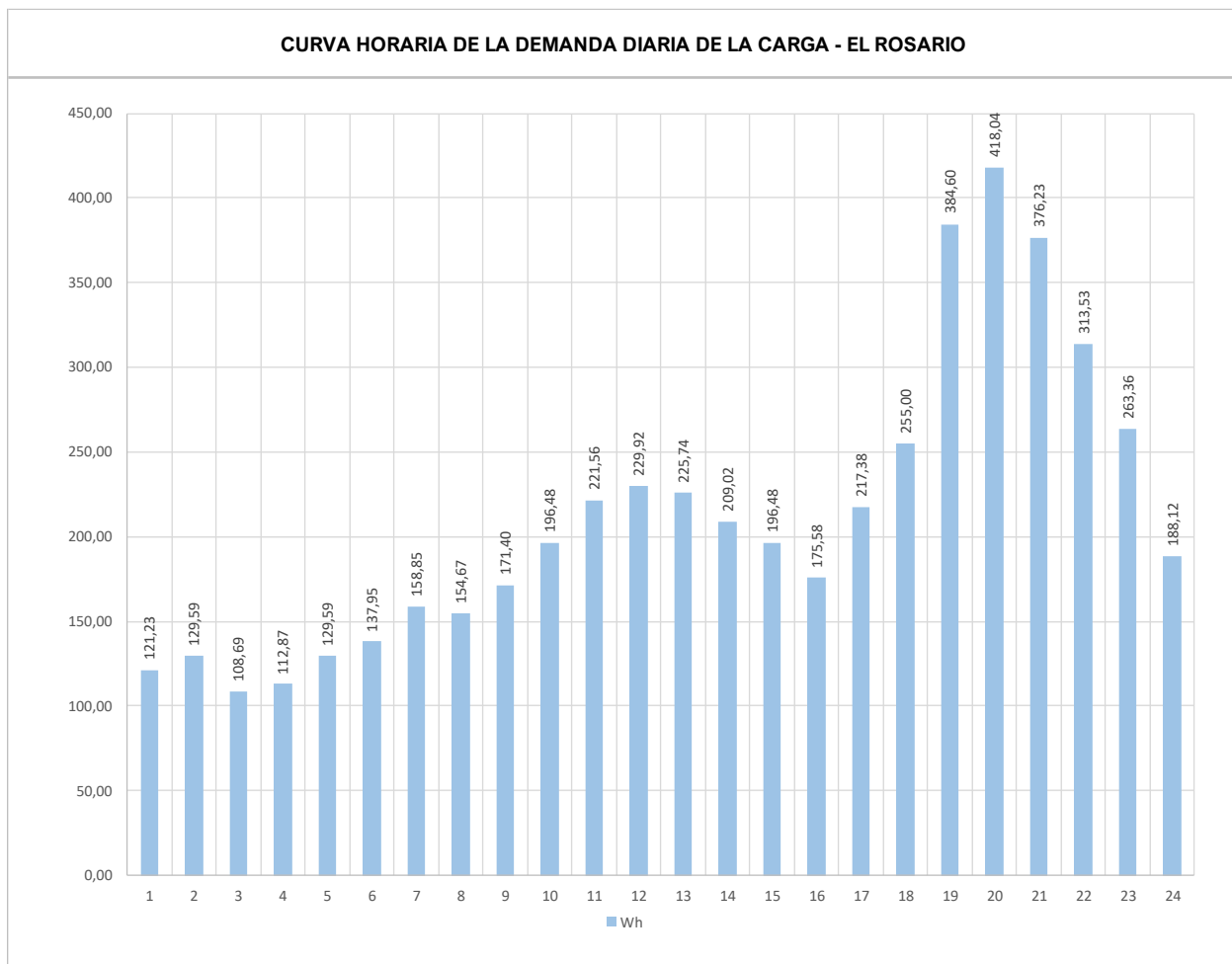
3.2.Curva de Demanda Por Usuario y Totales.

Las curvas de demanda eléctrica de la vereda El Rosario, ubicada en el municipio de San Pablo, Bolívar, muestran el comportamiento del consumo energético tanto a nivel de usuarios individuales como del total de la comunidad. Las curvas individuales reflejan variaciones en el consumo de energía a lo largo del día, con picos notables durante las horas de la mañana y la noche, coincidiendo con los momentos de mayor actividad doméstica, como el uso de electrodomésticos y la iluminación. Durante las horas intermedias del día, el consumo tiende a disminuir, posiblemente debido a la ausencia de los habitantes que realizan actividades fuera del hogar.

Por otro lado, la curva de demanda total de la vereda, que suma el consumo de todos los usuarios, presenta una tendencia similar, pero de mayor magnitud. Esta curva global también muestra picos durante las mañanas y noches, reflejando el patrón de uso colectivo de la energía en la comunidad. Estas curvas proporcionan una visión clara del comportamiento energético de la vereda, destacando los períodos de mayor y menor demanda, y permitiendo una comprensión integral del consumo eléctrico en la región.

Figura 5

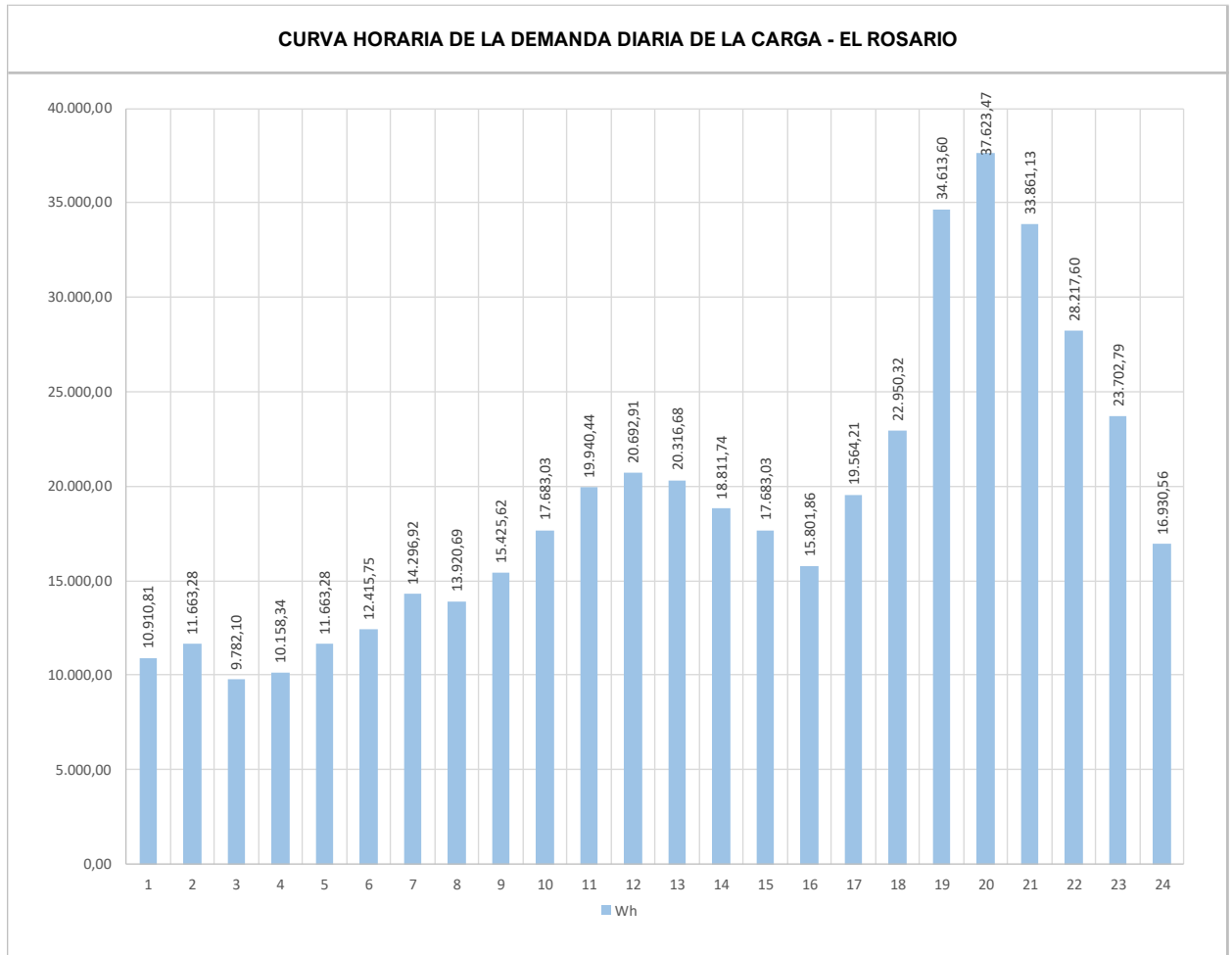
Histórico de Demanda por día y Respectivas Horas. Vereda el Rosario - Por Usuario



***Nota:** La figura proporciona una visión detallada del consumo de energía a lo largo de un día completo. Este tipo de análisis es fundamental para comprender cómo se distribuye el uso de la electricidad y para identificar patrones que puedan influir en la planificación energética.*

Figura 6

Curva de la demanda total en la vereda el rosario.



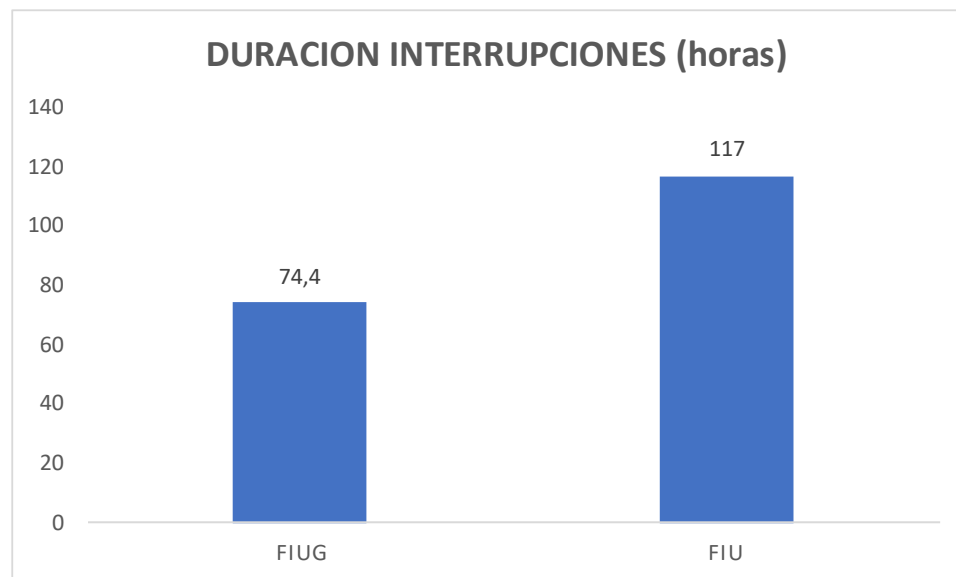
Nota: Elaboración Propia. Esta gráfica presenta la demanda total de energía acumulada de todos los usuarios combinados. Aquí se pueden observar los patrones de consumo globales y cómo se distribuyen a lo largo del día.

3.3.Indicadores de calidad

Las curvas de indicadores de calidad, obtenidas de la factura de energía, son fundamentales para evaluar la calidad del suministro eléctrico en un sector específico. Estas gráficas, proporcionadas por la ESSA (Electrificadora de Santander), permiten analizar aspectos clave como la continuidad del servicio y las fluctuaciones de voltaje. Evaluar estos factores es esencial para identificar áreas de mejora y asegurar un suministro eléctrico eficiente y confiable. La información derivada de estos indicadores contribuye a optimizar la calidad del servicio energético en la región.

Figura 7

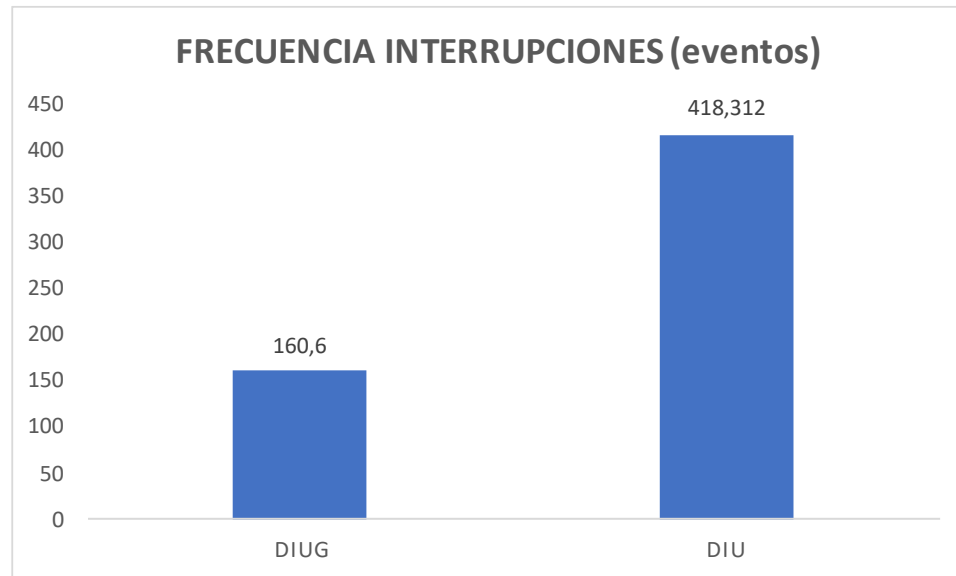
Interrupciones del servicio por horas.



Nota: Elaboración propia. Esta gráfica muestra la duración total acumulada de eventos de interrupción no programada en horas. El histograma permite visualizar la distribución y la frecuencia de estas interrupciones a lo largo de un período específico, lo cual es crucial para identificar patrones y periodos críticos en los que la infraestructura puede estar más vulnerable a fallos.

Figura 8

Frecuencia de Eventos (Interrupciones)



Nota: Elaboración propia. La gráfica representa el número total acumulado de eventos de interrupción no programada. Este indicador es fundamental para comprender la frecuencia con la que ocurren fallos en el sistema, permitiendo a los operadores del sistema identificar las causas recurrentes y desarrollar estrategias de mitigación para reducir el número de interrupciones y mejorar la fiabilidad del suministro de energía.

4. Alternativas De Soluciones Solares Para La Vereda El Rosario

En la descripción de cada una de las alternativas expuestas en esta sección se explicará por qué es una opción a considerar. El principal objetivo de este proyecto es mejorar la calidad del servicio de energía de la comunidad, dado que actualmente sufre de altas intermitencias, por lo cual es esencial la utilización de baterías. No obstante, también se evaluarán algunas alternativas sin el uso de baterías para establecer una comparación económica entre las diferentes opciones.

Para los cálculos de todas las alternativas que se presentarán, se debe tener en cuenta que, para calcular la generación estimada promedio mensual en el año por un sistema de paneles solares, se utiliza la siguiente fórmula:

Energía mensual

$$= \text{Potencia instalada DC} * \text{Horas pico Sol} * \text{Factor de corrección} \\ * 30 \text{ días/mes}$$

Ecuación 1. Cálculo de energía mensual generada por un sistema solar fotovoltaico.

En esta ecuación, la potencia instalada es la suma de las potencias de cada uno de los generadores fotovoltaicos o paneles solares utilizados en la instalación; las horas pico Sol representan el tiempo (en horas) de una hipotética irradiancia solar constante de 1.000 W/m²; y el factor de corrección se aplica para ajustar las desviaciones causadas por variaciones climáticas, nubosidad, acumulación de mugre en los paneles, inclinaciones imperfectas de los techos y las posibles pérdidas en el sistema eléctrico del proyecto.

Para el dimensionamiento del sistema de baterías, se emplea una ecuación que determina la capacidad mínima necesaria para el sistema. La ecuación es la siguiente:

Capacidad mínima baterías [Ah]

$$= \frac{\text{Demanda de energía diaria}}{\text{Profundidad de descarga} * \text{potencia del sistema de baterías}}$$

Ecuación 2. Cálculo de la cantidad de baterías necesaria para un sistema solar en Ah.

Esta expresión se utiliza cuando las especificaciones del equipo se entregan en unidades de amperios-hora (Ah). En esta ecuación, la demanda energética diaria se calcula dividiendo la demanda mensual previamente estimada entre 30 días. La profundidad de descarga indica el

porcentaje de energía que se puede utilizar del total de la carga de la batería. evitando su descarga total para prolongar su vida útil. El voltaje del sistema de baterías hace referencia al voltaje al cual se configura el banco de baterías. normalmente un múltiplo de 12 V.

En caso de que las especificaciones del equipo se entreguen en kilovatios-hora (kWh). en vez de Ah. en la ecuación se omite el voltaje y queda de la siguiente manera:

$$\text{Capacidad mínima baterías [kWh]} = \frac{\text{Demanda de energía diaria}}{\text{Profundidad de descarga}}$$

Ecuación 3. Cálculo de la cantidad de baterías necesaria para un sistema solar en kWh.

4.1. Alternativa 1: Cubrir la totalidad de la demanda de potencia de la vereda durante el día con una Comunidad Energética que realice Generación Distribuida Colectiva. con un nuevo transformador sin baterías.

Marco legal:

Esta propuesta es con una Comunidad Energética que realiza Generación Distribuida Colectiva (GDC). por lo que se enmarca dentro de las indicaciones del Decreto 2236 de 2023 del Ministerio de Minas y Energía. A falta de un decreto de la CREG. se trabajará con la suposición de que se tiene disponible el 50% de la capacidad del transformador para instalar inversores sin necesidad de realizar un estudio de conexión. Sin embargo. considerando la inversión que requiere el proyecto y que el estudio de conexión no impacta de manera significativa el presupuesto. se sobrepasará el límite del 50% y se realizará estudio de conexión.

Propuesta técnica:

En principio. si se quiere cubrir completamente la demanda energética de la comunidad con sistemas de generación de energía con fuentes alternativas. el transformador existente no

soporta la potencia necesaria. Es por ello que se hace necesario instalar un nuevo transformador y que su compra, transporte a sitio e instalación sea un proyecto incluido dentro del proyecto general de la planta fotovoltaica.

Al involucrar a una Comunidad Energética, la propuesta consiste en instalar un sistema solar centralizado en algún lote de la vereda, además, creando una microrred eléctrica. El sistema consta de 246 paneles solares de 500 W de potencia DC cada uno, para un total de 123 kW de potencia DC en total para la comunidad. La energía generada adicional de manera instantánea se podrá vender al comercializador de la zona. En caso de que falle la red pública de energía la energía producida por los paneles solo abastecerá a la comunidad durante el día gracias a la microrred creada. Durante la noche la comunidad no tendrá acceso a energía eléctrica, pero de modo que no se cumpliría el objetivo principal de este proyecto.

Este proyecto se dimensiona teniendo en cuenta los cálculos realizados en la Tabla 2, de modo que se cubre la totalidad de la demanda de potencia que puede llegar a tener la comunidad, aunque tener una simultaneidad de 100% en un sistema eléctrico comunitario es extremadamente extraño. Lo común es que la simultaneidad de la potencia utilizada por una comunidad de encuentre máximo entre el 50% y el 70% de la potencia instalada como demanda. Lo positivo de sobredimensionar este proyecto es que, por un lado, se prepara para un crecimiento futuro de la demanda, y por otro, si en el futuro se agregan baterías al sistema solar, la generación de energía podrá cubrir una parte del consumo nocturno.

Como no se va a acumular energía y solo se requiere exportar energía a la red pública, se pueden utilizar inversores de inyección a red no necesariamente híbridos. En este caso, teniendo en cuenta la calidad y la disponibilidad de equipos en el mercado, uno que se ajusta al proyecto es el Growatt MAX50KTL3-XL2, con una potencia de salida nominal de 50 kVA. Para ello, es

necesario instalar un transformador de por lo menos 75 kVA y realizar estudio de conexión al presentar el proyecto ante el operador de red.

Generación de energía:

$$\begin{aligned} \text{Energía mensual} &= 123.000 \text{ W} * 5 \text{ horas} * 0.85 * 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} \\ &= 15.682.5 \text{ kWh} - \text{mes} \end{aligned}$$

La comunidad en total tiene un consumo energético mensual de 15.579 kWh. por lo que se generará el 58.9% de esta demanda. Sin embargo. una parte considerable de esta energía será vendida al comercializador. Lo que se garantiza con este proyecto es que durante varias horas del día la comunidad podrá utilizar sus electrodomésticos con normalidad.

$$\text{Demanda energética cubierta} = 15.682.5 \frac{\text{kWh}}{15.579} \text{ kWh} = 100.7\%$$

$$\text{Demanda de potencia cubierta} = 72.500 \text{ kW} / 72.000 \text{ kW} = 100.7\%$$

Con esta propuesta no se cumple el objetivo de generar mensualmente el consumo de subsistencia de toda la comunidad.

Análisis económico:

Tabla 3

Presupuesto para la Alternativa 1 del proyecto solar fotovoltaico comunitario.

Ítem	Cantidad	Valor	Valor
		unitario	total
<hr/>			

Panel solar		\$	\$
monocrystalino 500 W	246	599.653	147.514.638
Inversor		\$	\$
Growatt MAX	1	23.211.116	23.211.116
50KTL3-XL2			
Estructura fotovoltaica	40	180.000	7.200.000
Accesorios	40	200.000	8.000.000
estructura fotovoltaica			
Contador	1	700.000	700.000
bidireccional			
Insumos	1	12.000.000	12.000.000
eléctricos			
Mano de obra	1	10.000.000	10.000.000
eléctrica			
Mano de obra	1	18.000.000	18.000.000
fotovoltaica			
Trámites frente a	1	5.000.000	5.000.000
ESSA			
Suministro.			
transporte e instalación	1	60.000.000	60.000.000
de transformador 75			
kVA			

			\$
Subtotal			290.926.454
			\$
AIU	1	15%	43.638.968
<hr/>			\$
Total			334.565.422
<hr/>			

Nota: Cotización. Elaboración propia.

4.2. Alternativa 2: Cubrir el 100% de la demanda con una Comunidad Energética que realiza Generación Distribuida Comunitaria con un nuevo transformador e incluir baterías.

Marco legal:

Esta propuesta es con una Comunidad Energética que realiza Generación Distribuida Colectiva (GDC), por lo que se enmarca dentro de las indicaciones del Decreto 2236 de 2023 del Ministerio de Minas y Energía. A falta de un decreto de la CREG, se trabajará con la suposición de que se tiene disponible el 50% de la capacidad del transformador para instalar inversores sin necesidad de realizar un estudio de conexión. Sin embargo, considerando la inversión que requiere el proyecto y que el estudio de conexión no impacta de manera significativa el presupuesto, se sobrepasará el límite del 50% y se realizará estudio de conexión.

Propuesta técnica:

En principio, si se quiere cubrir completamente la demanda energética de la comunidad con sistemas de generación de energía con fuentes alternativas, el transformador existente no

soporta la potencia necesaria. Es por ello que se hace necesario instalar un nuevo transformador y que su compra, transporte a sitio e instalación sea un proyecto incluido dentro del proyecto general de la planta fotovoltaica. El nuevo transformador tendrá una potencia de 150 kVA para poder conectarle 120 kVA de potencia de inversores.

Al involucrar a una Comunidad Energética, la propuesta consiste en instalar un sistema solar centralizado en algún lote de la vereda, además, creando una microrred eléctrica. El sistema consta de 245 paneles solares de 500 W de potencia DC cada uno, para un total de 122.5 kW de potencia DC en total para la comunidad. La energía generada adicional se podrá acumular en las baterías antes de ser vendida al comercializador de la zona, sobre todo, en caso de que falle la red pública de energía, tanto la energía producida por los paneles (durante el día) como la acumulada en las baterías (durante la noche) podrá ser utilizada por la comunidad gracias a la microrred creada.

Este proyecto se dimensiona teniendo en cuenta los cálculos realizados en la Tabla 2, de modo que se cubre la totalidad de la demanda energética que puede llegar a tener la comunidad según las estimaciones tenidas en cuenta en la tabla, que son en base al consumo de subsistencia.

Para poder acumular energía y también exportar energía a la red pública, se requiere del uso de inversores híbridos. En este caso, teniendo en cuenta la calidad y la disponibilidad de equipos en el mercado, uno que se adapta a la necesidad del proyecto es el Huawei SUN2000L-60kVA KTL M0, con una potencia de salida nominal de 60 kVA. Se decide utilizar 2 inversores de la referencia previamente mencionada, los cuales se conectarán en paralelo, para no depender de un solo equipo y dar más confiabilidad a los usuarios del proyecto.

En cuanto a las baterías, ya que se quiere que toda la comunidad goce del beneficio de tener energía, aunque la red del comercializador esté fallando, se considera un gran banco de baterías, que consiste en 130 baterías conectadas...

Generación de energía:

$$\begin{aligned} \text{Energía mensual} &= 122500 \text{ W} * 5 \text{ horas} * 0.85 * 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} \\ &= 15.618.8 \text{ kWh} - \text{mes} \end{aligned}$$

La comunidad en total tiene un consumo energético mensual de 15.579 kWh, por lo que se generará el 100% de esta demanda. Sin embargo, una parte considerable de esta energía será vendida al comercializador. Lo que se garantiza con este proyecto es que durante varias horas del día la comunidad podrá utilizar sus electrodomésticos con normalidad.

$$\text{Demanda energética cubierta} = 15.618.8 \text{ kWh} / 15.579 \text{ kWh} = 100.3\%$$

$$\text{Demanda de potencia cubierta} = 72.200 \text{ kW} / 72.000 \text{ kW} = 100.3\%$$

Con esta propuesta no se cumple el objetivo de generar mensualmente el consumo de subsistencia de toda la comunidad.

Dimensionamiento del sistema de baterías:

Para esta alternativa se está utilizando un sistema Huawei con la batería LUNA2000-5KW-C0, que indica en sus especificaciones una capacidad de 5.000 Wh, por lo tanto, la ecuación a utilizar omite el voltaje de trabajo del sistema de acumulación. El cálculo se realiza teniendo en cuenta que la demanda diaria de energía en la comunidad es de 519.300 Wh. A partir de la siguiente ecuación se calcula:

$$\text{Capacidad mínima baterías} = \frac{519.300 \text{ Wh}}{0.8} = 1'298.250 \text{ kWh}$$

$$\text{Cantidad mínima baterías} = \frac{649.125}{5.000} = 129.825 \text{ baterías}$$

Análisis económico:

Tabla 4

Presupuesto para la Alternativa 2 del proyecto solar fotovoltaico comunitario.

Ítem	Cantidad	Valor	Valor
		unitario	total
Panel solar monocrystalino 500 W	245	\$ 599.653	\$ 146.914.985
Inversor Huawei SUN2000L - 60kVA KTL M0	2	\$ 22.910.448	\$ 45.820.896
Batería Litio Huawei Luna 2000 5kWh	130	\$ 12.153.678	\$ 1.579.978.140
BMS Huawei Luna 2000	87	\$ 5.725.884	\$ 498.151.908
Backup Box B0 Luna 2000	2	\$ 3.156.468	\$ 6.312.936
Estructura fotovoltaica	82	\$ 180.000	\$ 14.760.000

Accesorios		\$	\$
estructura fotovoltaica	82	200.000	16.400.000
Contador		\$	\$
bidireccional	1	2.000.000	2.000.000
Insumos		\$	\$
eléctricos	1	20.000.000	20.000.000
Mano de obra		\$	\$
eléctrica	1	12.000.000	12.000.000
Mano de obra		\$	\$
fotovoltaica	1	25.000.000	25.000.000
Trámites frente		\$	\$
a ESSA	1	8.000.000	8.000.000
Suministro.			
transporte e instalación		\$	\$
de transformador 150	1	100.000.000	100.000.000
kVA			
Subtotal			\$
			2.475.338.865
AIU	1	15%	\$
			371.300.829
Total			\$
			2.846.639.694

Nota: Cotización. Elaboración propia.

4.3. Alternativa 3: Cubrir el 100% de la demanda energética de la vereda con un Sistema Híbrido Offgrid con transferencia energética y almacenamiento aplicado individualmente por vivienda.

Marco legal:

La propuesta de un sistema híbrido offgrid con transferencia energética y almacenamiento se ajusta a la Ley 1715 de 2014, la Ley 2099 de 2021, y las resoluciones CREG 174 y 135 de 2021. Estas regulaciones proporcionan un marco legal para la implementación de soluciones energéticas autónomas, asegurando que cumplan con los estándares necesarios para su operación segura y eficiente fuera de la red eléctrica. Esta alternativa se implementará individualmente en cada vivienda, permitiendo a cada hogar contar con su propio sistema de suministro energético autónomo.

Propuesta técnica:

Para un sistema híbrido offgrid, es esencial contar con un almacenamiento de energía robusto que garantice el suministro durante las horas sin irradiación solar. Se propone la instalación de módulos fotovoltaicos TRINA SOLAR de 575 W y un inversor Growatt SPF 3000W 24V 80A LVM. Este sistema se complementa con baterías adecuadamente dimensionadas para almacenar la energía generada durante el día y suministrarla durante la noche. La potencia instalada en DC es de 1.725 kW, asegurando un suministro continuo de energía a la comunidad.

Generación de energía:

La energía generada mensualmente se calcula mediante la fórmula:

$$\text{Energía mensual} = 1.725 \text{ kW} \times 5 \text{ horas} \times 0.85 \times 30 \text{ días} = 219.93 \text{ kWh/mes}$$

Para sistemas con mayor capacidad, la generación sería proporcionalmente mayor. Este diseño asegura que la comunidad pueda cubrir su demanda energética, estimada en 173.1 kWh/mes, durante las 24 horas del día, gracias al almacenamiento energético.

Dimensionamiento del sistema de baterías:

Para un sistema con un consumo diario de 5750 Wh, se ha dimensionado el almacenamiento utilizando baterías AGM de 12V-200Ah. Estas baterías, con una capacidad utilizable de 1440 Wh, son fiables y de larga duración. Se requieren aproximadamente 4 baterías para cubrir la demanda diaria, asegurando un suministro continuo y eficiente de energía. Las baterías AGM de 12V-200Ah son ideales por su fiabilidad y bajo mantenimiento.

$$\text{Consumo Mensual} = 173.1 \frac{\text{kWh}}{\text{dia}}$$

$$\text{Consumo diario} = 5750 \frac{\text{Wh}}{\text{dia}}$$

Baterías:

$$200 \text{ Ah} - 12 \text{ V}$$

$$P = 2400 \text{ Wh (100\%)}$$

$$P_{\text{util}} = 2400 * 60\% = 1440$$

$$\text{Numero de Baterias} = \frac{5750}{1440}$$

$$\text{Numero de Baterias} = 4$$

Análisis económico:

Tabla 5*Presupuesto para la Alternativa 3 del proyecto solar fotovoltaico comunitario.*

DESCRIPCION	CANTIDA D	VALO R UNITARIO	VALO R TOTAL
PANEL SOLAR TRINA		\$	\$
SOLAR 575 W	3	460.000.00	1.380.000.00
ESTRUCTURA		\$	\$
FOTOVOLTAICA	1	150.000.00	150.000.00
CABLE SOLAR		\$	\$
	20	6.000.00	120.000.00
DC: GABINETE CON		\$	\$
PROTECCIONES ELECTRICAS	1	1.080.000.00	1.080.000.00
(TGDC)			
AC: GABINETE CON		\$	\$
PROTECCIONES ELECTRICAS	1	500.000.00	500.000.00
(TGBT)			
INVERSOR SPF3000TLLVM-		\$	\$
24P	1	2.779.590.00	2.779.590.00
CABLE AC Y TIERRA		\$	\$
	20	2.600.00	52.000.00
TOTALIZADOR		\$	\$
	1	60.000.00	60.000.00

TRANSFERENCIA		\$	\$
AUTOMATICA	1	478.000.00	478.000.00
INSUMOS ELECTRICOS	1	400.000.00	400.000.00
MANO DE OBRA		\$	\$
ELECTRICA	1	300.000.00	300.000.00
MANO DE OBRA		\$	\$
FOTOVOLTAICA	1	500.000.00	500.000.00
TRAMITES ANTE EL OR	1	250.000.00	250.000.00
BATERIAS	4	1.634.879.00	6.539.516.00
		TOTA	\$
		L	14.589.106.00

Nota: Cotización. Elaboración propia.

El total de este proyecto sería equivalente al valor individual de cada proyecto por la cantidad de proyectos. que son 90. Así. el total de la inversión es:

$$\text{Inversión} = \$14.589.106 * 90 = \mathbf{\$131.301.954}$$

4.4.Alternativa 4: Sistema de Microred Ongrid con Almacenamiento aplicado individualmente por vivienda.

Marco legal:

Esta alternativa contempla un sistema de microred conectado a la red pública con almacenamiento de energía, lo que se enmarca dentro de las normativas vigentes como la Ley 1715 de 2014, la UPME 045 de 2016, la Ley 2099 de 2021, y las resoluciones CREG 174 y 135 de 2021, además del RETIE 2013 y la NEC 2014. Estas normativas regulan la implementación de energías renovables y la interacción con la red eléctrica, garantizando la correcta integración y operación de los sistemas de generación distribuida. Esta alternativa se implementará individualmente en cada vivienda, asegurando que cada hogar cuente con un sistema autónomo y eficiente.

Propuesta técnica:

Para cubrir completamente la demanda energética de la comunidad mediante un sistema de microred con almacenamiento, es esencial instalar paneles solares eficientes y sistemas de almacenamiento confiables. El proyecto propone utilizar módulos fotovoltaicos TRINA SOLAR de 575 W cada uno, y un inversor Solax X1-HYBRID-3.0-D. Este sistema se complementa con baterías adecuadamente dimensionadas para almacenar la energía generada durante el día y suministrarla durante la noche. La potencia instalada en DC es de 3.45 kW, asegurando un suministro continuo de energía a la comunidad. Para garantizar la seguridad y eficiencia del sistema, se propone la instalación de un transformador de 75 kVA.

Generación de energía:

La energía mensual generada se calcula considerando una eficiencia del 85% y una irradiación solar de 5 horas diarias. Así, para sistemas de microred con una capacidad de 3.45 kW, la generación mensual estimada sería de 439.875 kWh. La demanda energética de la comunidad se estima en 173.1 kWh mensuales, lo que implica que la generación proyectada cubrirá el 100% de la demanda, asegurando un suministro constante y fiable de energía.

Dimensionamiento del sistema de baterías:

Para un sistema con un consumo diario de 5750 Wh, se ha dimensionado el almacenamiento utilizando baterías AGM de 12V-200Ah. Estas baterías, con una capacidad utilizable de 1440 Wh, son fiables y de larga duración. Se requieren aproximadamente 4 baterías para cubrir la demanda diaria, asegurando un suministro continuo y eficiente de energía. Las baterías AGM de 12V-200Ah son ideales por su fiabilidad y bajo mantenimiento.

$$\text{Consumo Mensual} = 173.1 \frac{\text{kWh}}{\text{dia}}$$

$$\text{Consumo diario} = 5750 \frac{\text{Wh}}{\text{dia}}$$

Baterías:

$$200 \text{ Ah} - 12 \text{ V}$$

$$P = 2400 \text{ Wh (100\%)}$$

$$P_{\text{util}} = 2400 * 60\% = 1440$$

$$\text{Numero de Baterias} = \frac{5750}{1440}$$

$$\text{Numero de Baterias} = 4$$

Análisis económico:

Tabla 6

Presupuesto para la Alternativa 4 del proyecto solar fotovoltaico comunitario.

DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR	VALOR
		UNITARIO	TOTAL

PANEL SOLAR TRINA SOLAR 575 W	6	\$ 460.000.00	\$ 2.760.000.00
ESTRUCTURA FOTOVOLTAICA	2	\$ 150.000.00	\$ 300.000.00
CABLE SOLAR	40	\$ 6.000.00	\$ 240.000.00
DC: GABINETE CON PROTECCIONES ELECTRICAS (TGDC)	2	\$ 1.080.000.00	\$ 2.160.000.00
AC: GABINETE CON PROTECCIONES ELECTRICAS (TGBT)	2	\$ 500.000.00	\$ 1.000.000.00
INVERSOR X1-HYBRID-3.0-D	1	6.727.501.00	\$ 6.727.501.00
CABLE AC Y TIERRA	40	\$ 2.600.00	\$ 104.000.00
TOTALIZADOR	1	\$ 60.000.00	\$ 60.000.00
INSUMOS ELECTRICOS	2	\$ 400.000.00	\$ 800.000.00
MANO DE OBRA ELECTRICA	2	\$ 300.000.00	\$ 600.000.00
MANO DE OBRA FOTOVOLTAICA	2	\$ 500.000.00	\$ 1.000.000.00

		\$	\$
TRAMITES ANTE EL OR	1	250.000.00	250.000.00
		\$	\$
BATERIAS	4	1.634.879.00	6.539.516.00
		\$	\$
MEDIDOR BIDIRECCIONAL	1	560.000.00	560.000.00
			\$
SUBTOTAL			23.101.077
			\$
AIU 15%			3.465.161,55
			\$
TOTAL			26.566.238,55

Nota: Cotización. Elaboración propia.

El total de este proyecto sería equivalente al valor individual de cada proyecto por la cantidad de proyectos. que son 90. Así. el total de la inversión es:

Suministro. transporte e instalación de transformador 75 kVA = \$60.000.000

$$Inversión = (\$26.566.238,55 * 90) + (60.000.000) = \mathbf{\$2.450.961.469,5}$$

4.5.Alternativa 5: Sistemas Ongrid sin almacenamiento aplicados individualmente por vivienda.

Marco legal:

La implementación de sistemas ongrid sin almacenamiento está regulada por la Ley 1715 de 2014, la Ley 2099 de 2021 y las resoluciones CREG 174 y 135 de 2021, que establecen las directrices para la integración de fuentes de energía renovable a la red eléctrica. Estas normativas aseguran que los sistemas fotovoltaicos cumplan con los estándares técnicos y de seguridad, facilitando la conexión y operación dentro del sistema eléctrico nacional. Esta alternativa se implementará individualmente en cada vivienda, garantizando un acceso equitativo y eficiente a la energía generada por el sistema fotovoltaico.

Propuesta técnica:

Para esta alternativa, se propone la instalación de un sistema fotovoltaico conectado directamente a la red sin almacenamiento. Se utilizarán módulos solares TRINA SOLAR de 575 W, combinados con un solo inversor Solax X1-MINI-2.0K-G4 de 2 kVA. Este diseño permite aprovechar al máximo la generación solar durante las horas de mayor irradiación, inyectando la energía producida directamente a la red. La potencia instalada en AC es de 2 kVA, mientras que, en DC, la potencia es de 1.725 kW. Además, se instalará un transformador de 75 kVA para asegurar la correcta distribución y el manejo de la energía generada por los sistemas individuales de cada vivienda.

Generación de energía:

El sistema generará energía mensualmente a partir de la fórmula: Energía mensual = 1.725 kW \times 5 horas \times 0.85 \times 30 días = 219.93 kWh/mes. Para una instalación de 1.725 kW, la energía mensual generada sería de 219.93 kWh. Este cálculo asegura que la demanda energética de la comunidad, estimada en 173.1 kWh/mes, será cubierta en su totalidad, garantizando un suministro continuo y eficiente de energía.

Análisis Económico:

Tabla 7

Presupuesto para la Alternativa 5 del proyecto solar fotovoltaico comunitario.

DESCRIPCION	CANTIDA D	VALO R UNITARIO	VALO R TOTAL
PANEL SOLAR TRINA		\$	\$
SOLAR 575 W	3	460.000.00	1.380.000.00
ESTRUCTURA		\$	\$
FOTOVOLTAICA	1	150.000.00	150.000.00
CABLE SOLAR		\$	\$
	20	6.000.00	120.000.00
DC: GABINETE CON		\$	\$
PROTECCIONES ELECTRICAS	1	1.080.000.00	1.080.000.00
(TGDC)			
AC: GABINETE CON		\$	\$
PROTECCIONES ELECTRICAS	1	500.000.00	500.000.00
(TGBT)			
INVERSOR X1-MINI-2.0K-G4		\$	\$
	1	2.382.322.00	2.382.322.00
CABLE AC Y TIERRA		\$	\$
	20	2.600.00	52.000.00

		\$	\$
TOTALIZADOR	1	60.000.00	60.000.00
		\$	\$
MEDIDOR BIDIRECCIONAL	1	530.000.00	530.000.00
		\$	\$
INSUMOS ELECTRICOS	1	400.000.00	400.000.00
		\$	\$
MANO DE OBRA ELECTRICA	1	300.000.00	300.000.00
		\$	\$
MANO DE OBRA FOTOVOLTAICA	1	500.000.00	500.000.00
		\$	\$
TRAMITES ANTE EL OR	1	250.000.00	250.000.00
<hr/>			\$
TOTAL			7.704.322.00
<hr/>			

Nota: Cotización. Elaboración propia.

El total de este proyecto sería equivalente al valor individual de cada proyecto por la cantidad de proyectos. que son 90. Así. el total de la inversión es:

Suministro. transporte e instalación de transformador 75 kVA = \$60.000.000

$$Inversión = (\$7.704.322.00 * 90) + (60.000.000) = \$753.388.980$$

5. Resumen de propuestas de solución

Las siguientes propuestas fueron analizadas para determinar la mejor opción para el proyecto solar fotovoltaico comunitario:

Alternativa 1: Cubrir la totalidad de la demanda de potencia de la vereda durante el día con una Comunidad Energética que realice Generación Distribuida Colectiva. con un nuevo transformador sin baterías.

Esta propuesta implica la instalación de un sistema solar centralizado en una Comunidad Energética bajo el Decreto 2236 de 2023 del Ministerio de Minas y Energía. Dado que el transformador existente no soporta la potencia necesaria. se instalará uno nuevo de 75 kVA y se realizará un estudio de conexión. Se instalarán 246 paneles solares de 500 W cada uno. totalizando 123 kW de potencia DC. La energía adicional generada se venderá al comercializador local. El costo total del proyecto es de \$334.565.422.

Alternativa 2: Cubrir el 100% de la demanda con una Comunidad Energética que realiza Generación Distribuida Comunitaria con un nuevo transformador e incluir baterías.

Esta propuesta implica la instalación de un sistema solar centralizado en una Comunidad Energética bajo el Decreto 2236 de 2023 del Ministerio de Minas y Energía. Se instalará un nuevo transformador de 150 kVA y se realizará un estudio de conexión. El sistema incluye 245 paneles solares de 500 W. totalizando 122.5 kW de potencia DC. y 130 baterías Huawei LUNA2000-5KW-C0 para almacenamiento de energía. Dos inversores Huawei SUN2000L-60kVA KTL M0 se utilizarán para exportar energía a la red pública. El costo total del proyecto es de \$2.846.639.694.

Alternativa 3: Cubrir el 100% de la demanda energética de la vereda con un Sistema Híbrido Offgrid con transferencia energética y almacenamiento aplicado individualmente por vivienda.

Esta propuesta, bajo las Leyes 1715 y 2099 de 2014 y 2021 respectivamente, incluye la instalación de módulos fotovoltaicos TRINA SOLAR de 575 W y un inversor Growatt SPF 3000W

24V 80A LVM, complementados con baterías AGM de 12V-200Ah para almacenamiento. La potencia instalada será de 1.725 kW, generando 219.93 kWh mensuales. El costo total del proyecto es de \$14.589.106 por vivienda, con una inversión total de \$131.301.954 para 90 viviendas.

Alternativa 4: Sistema de Microred Ongrid con Almacenamiento aplicado individualmente por vivienda.

Esta propuesta contempla la instalación de un sistema de microred conectado a la red pública, con almacenamiento de energía y basado en la Ley 1715 de 2014, la Ley 2099 de 2021, y las resoluciones CREG 174 y 135 de 2021. Se utilizarán módulos fotovoltaicos TRINA SOLAR de 575 W y el inversor Solax X1-HYBRID-3.0-D. La capacidad instalada en DC será de 3.45 kW, generando 439.875 kWh mensuales, suficiente para cubrir la demanda energética de la comunidad. El costo total del proyecto es de \$26.566.238,55 por vivienda, y la inversión total para 90 viviendas es de \$2.450.961.469,5.

Alternativa 5: Sistemas Ongrid sin almacenamiento aplicados individualmente por vivienda.

Esta propuesta incluye la instalación de un sistema fotovoltaico conectado directamente a la red sin almacenamiento, cumpliendo con la Ley 1715 de 2014, la Ley 2099 de 2021 y las resoluciones CREG 174 y 135 de 2021. Se utilizarán módulos fotovoltaicos TRINA SOLAR de 575 W y un inversor Solax X1-MINI-2.0K-G4, con una potencia instalada en DC de 1.725 kW, generando 219.93 kWh mensuales, suficiente para cubrir la demanda energética de la comunidad. El costo total del proyecto es de \$7.704.322,00 por vivienda, y la inversión total para 90 viviendas es de \$753.388.980.

Tabla 8*Resumen de Propuestas*

ALTERNATIVA	DESCRIPCION	POTENCIA INSTALADA (kW)	COSTO TOTAL
5.1	Comunidad Energética con Generación Distribuida y nuevo transformador sin baterías	123	\$ 334.565.422
5.2	Comunidad Energética con Generación Distribuida. nuevo transformador y baterías	122.5	\$ 2.846.639.694
5.3	Sistema Hibrido Offgrid con transferencia y almacenamiento	155.25	\$ 131.301.954
5.4	Sistema de Microred Ongrid con Almacenamiento	310.5	\$ 2.450.961.469,5
5.5	Sistemas Ongrid sin almacenamiento	155.25	\$ 753.388.980

*Nota: Cotización. Elaboración propia.***5.1.Descripción de la propuesta técnica y económica seleccionada**

Los precios de este proyecto se tomaron de una página web que vende equipos fotovoltaicos al detal. La realidad. es que para un proyecto con estas cantidades se pueden negociar precios para comprar todos los equipos al por mayor. por lo que los costos pueden ser menores a

los previamente planteados. El presupuesto sobrante podría ser utilizado para adecuaciones eléctricas que lleguen a necesitar algunas casas. por ejemplo. instalar puesta a tierra en las casas donde este equipo es inexistente. O colocando estructura para el montaje de los paneles en casas en las cuales la estructura del techo no sea adecuada para un proyecto como el planteado.

Teniendo en cuenta la tabla de la sección anterior. el resumen de las propuestas. vemos que hay 3 alternativas que cubren la demanda energética de la comunidad y también dan Después de evaluar todas las propuestas. se seleccionaron tres alternativas para su implementación debido a sus ventajas complementarias:

Sistema Híbrido Offgrid con transferencia energética y almacenamiento:

Este sistema garantiza un respaldo completo en caso de fallos de red. asegurando una continuidad en el suministro energético crucial para la comunidad. Su capacidad de transferencia energética y almacenamiento lo hace ideal para situaciones donde la confiabilidad y la independencia energética son prioritarias.

Sistema de microred Ongrid con Almacenamiento:

Este sistema mejora significativamente la confiabilidad del suministro eléctrico. proporcionando almacenamiento de energía y creando una microred interconectada con la red principal. Esto aumenta la resiliencia ante fallos de la red pública y optimiza el uso de la energía generada.

Sistemas Ongrid sin almacenamiento:

Esta opción es perfecta para reducir los costos de las facturas eléctricas de los pobladores. ofreciendo una solución económica eficiente. Al estar conectados a la red sin almacenamiento.

estos sistemas aprovechan la energía solar para disminuir el consumo de energía de la red pública, generando ahorros significativos. En primer lugar, los anexos se encuentra un diagrama unifilar esquemático, en el cual se puede ver cómo serían las conexiones de cada uno de los componentes del sistema y las especificaciones eléctricas de los diferentes equipos, calibre de cables y protecciones a utilizar. En Anexos se encuentra la Memoria de Cálculos, documento en el cual se justifica cada uno de los elementos seleccionados para el desarrollo del proyecto, incluyendo los paneles fotovoltaicos, el inversor, las baterías, el calibre de los cables de cada tramo, las protecciones, entre otros. Este es un documento muy importante para el proyecto, aunque se entrega en un Anexo debido a su extensión, ya que sigue un formato de la CREG que resulta en varias páginas de cálculos y anotaciones técnicas.

Consideraciones: En las alternativas seleccionadas que implican inyección de energía a la red, es fundamental reemplazar el transformador por uno que pueda manejar la cantidad de energía a exportar. Dependiendo del transformador, será necesario realizar un estudio de conexión simplificado, requerido por la operadora de red para asegurar la integración adecuada y segura del sistema.

Este proyecto tiene un componente social y educativo importante, pues se debe hacer una divulgación en la cual los usuarios reciban una capacitación en la cual se les indique y creen conciencia de que los sistemas instalados son para cubrir necesidades básicas, por lo que no deben abusar del consumo energético. Además, si realizan una inversión propia, estos sistemas pueden ser ampliados, tanto en cantidad de paneles como en cantidad de baterías, siempre asesorados por expertos en la materia. Lo ideal es que los sistemas solo sean manipulados por la empresa que realizó la instalación para que se sigan cubriendo las garantías iniciales.

6. Conclusiones

El proyecto ha logrado un análisis de las necesidades energéticas de la comunidad, considerando tanto la carga eléctrica de las viviendas como la topografía de la vereda. Se destaca la importancia de comprender el contexto de la comunidad para diseñar soluciones energéticas adecuadas. Es crucial resaltar elementos como la dispersión y el tamaño de las viviendas, así como la disponibilidad de recursos energéticos.

Después de analizar todas las alternativas y evaluar las condiciones específicas de la comunidad, se concluye que la implementación de sistemas solares fotovoltaicos con distintas configuraciones ofrece múltiples beneficios. La combinación de sistemas Offgrid con almacenamiento y sistemas Ongrid sin almacenamiento proporciona una solución integral que mejora la confiabilidad del suministro.

Los hallazgos destacan la importancia de adaptar soluciones energéticas a las necesidades locales específicas, optimizando recursos y maximizando el impacto positivo en la comunidad. Las propuestas seleccionadas no solo cumplen con los requisitos técnicos y legales, sino que también ofrecen una mejora significativa en la calidad de vida de los residentes de la vereda, promoviendo la sostenibilidad y la independencia energética.

Además, se observa que la propuesta del Sistema Offgrid con transferencia energética y almacenamiento es especialmente adecuada para garantizar un respaldo completo, lo que es crucial en áreas con fallos frecuentes de red. Por otro lado, el Sistema de microred Ongrid con almacenamiento mejora la confiabilidad y resiliencia del suministro eléctrico, mientras que los sistemas Ongrid sin almacenamiento representan una solución económica que permite a los pobladores reducir sus costos de energía sin necesidad de grandes inversiones iniciales.

Gracias a los conocimientos de los autores. se pueden plantear soluciones integrales. incluso con ingeniería de detalle y diagramas en programas de software especializados. Se ha desarrollado un diseño detallado de la alternativa seleccionada. incluyendo memorias de cálculo. planos y presupuestos de inversión. Se enfatiza la importancia de la planificación meticulosa y la ingeniería de detalle en la implementación exitosa de proyectos energéticos. asegurando la eficiencia y la viabilidad a largo plazo.

Finalmente. se recomienda la implementación de estas tres alternativas seleccionadas. ya que juntas proporcionan una cobertura completa de las necesidades de energía eléctrica de la comunidad. asegurando sostenibilidad. eficiencia y ahorro económico a largo plazo.

Referencias

- Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (30 de Noviembre de 2021). *Resolución CREG 0174 de 2021*. Recuperado el 23 de Julio de 2024. de Gestor Normativo: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0174_2021.htm
- DataCenter Dynamics. (2023). *Mercado energético en Colombia: avances, dificultades y tensiones en la transición*. Recuperado el 23 de julio de 2024. de DataCenter Dynamics: <https://www.datacenterdynamics.com/es/features/mercado-energ%C3%A9tico-en-colombia-avances-dificultades-y-tensiones-en-la-transici%C3%B3n/>
- Departamento Administrativo de la Función Pública. (26 de Mayo de 2015). *Decreto 1083 de 2015*. Recuperado el 23 de julio de 2024. de Función Pública: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- EALDE Business School. (s.f.). *Proyectos de energía solar fotovoltaica de autoconsumo*. Recuperado el 23 de julio de 2024. de EALDE Business School: <https://www.ealde.es/proyectos-energia-solar-fotovoltaica-autoconsumo/>
- Grupo Elektra. (Octubre de 2014). *Cómo somos los de Elektra: Qué son las HSP*. Recuperado el 23 de julio de 2024. de Grupo Elektra Blog: <https://www.grupoelektra.es/blog/wp-content/uploads/2014/10/como-somos-los-delektra-que-son-las-HSP.pdf>
- La República. (16 de Mayo de 2023). *Cerca de 97% de los colombianos tiene acceso a la energía eléctrica, según MinEnergía*. Recuperado el 23 de julio de 2024. de La República: <https://www.larepublica.co/especiales/el-apagon-de-1992-1993/cerca-de-97-de-los-colombianos-tiene-acceso-a-la-energia-electrica-segun-minenergia-3565120>

Ministerio de Minas y Energía. (s.f.). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)*.

Recuperado el 23 de Julio de 2024. de Ministerio de Minas y Energía:
<https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-2/reglamentos-tecnicos/reglamento-t%C3%A9cnico-de-instalaciones-el%C3%A9ctricas-retie/>

Montaño. J. J. (15 de Junio de 2021). *Estudio de factibilidad para la creación de una empresa comercializadora de energía eléctrica en la Costa Caribe Colombiana*. Recuperado el 23 de Julio de 2024. de Repositorio institucional Manglar de la Universidad del Norte:
<https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/10199/1193407200.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Naciones Unidas. (s.f.). *Energía asequible y no contaminante*. Recuperado el 23 de Julio de 2024. de Naciones Unidas: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (Octubre de 2021). *Integración de energías renovables en el sistema eléctrico colombiano*. Recuperado el 23 de Julio de 2024. de UPME:
https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVABLES_WEB.pdf