

Diseño de Solución de Generación con Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) para la Comunidad “Coexistiendo con el Cóndor” en el Páramo del Almorzadero

Diego Alejandro Pérez Pérez , Yorman Andrey Güiza Mosquera

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingenieros Electricistas

Director

Rolando Andrés Rincón Saravia

Magister en Dirección de Empresas, Área Ingeniería eléctrica

Codirector

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Doctor en Tecnología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi madre, **Mery Pérez Pacheco**, una mujer perseverante que jamás se rindió en el camino y que, con su amor, esfuerzo y dedicación, siempre apoyó mis estudios sin condiciones. Tu ejemplo ha sido mi motor.

A mi padre, **Eliecer Pérez**, quien, aunque ya no está físicamente entre nosotros, me enseñó el valor del esfuerzo y me dejó como legado la convicción de que todo sacrificio tiene su recompensa. Esta meta también es tuya, papá.

A mi hermana, **Ángela Patricia Pérez**, por ser un apoyo incondicional en los momentos más difíciles de este camino. Tus palabras de aliento y tu compañía fueron clave en los días de mayor desafío.

A mi tía **Irene Pérez**, que, aunque no estás entre nosotros, tu amor y apoyo incondicional siempre fueron una gran compañía. Por ti también se logró. Sé que lo soñaste y hoy es una realidad.

A mí mismo, por no desistir, por levantarme en cada caída y seguir adelante con la firme convicción de que todo esfuerzo vale la pena. No fue fácil el proceso, pero hoy, con orgullo, puedo decir: ¡Lo logramos!

Diego Alejandro Pérez

Dedicatoria

A mi mamá, Estela Mosquera, por querer siempre verme estudiar, por ser quien me encaminó en el mundo académico, me enseñó a amarlo y valorarlo. Aprendí a persistir, a soñar con un futuro mejor y a trabajar por él sin rendirme.

A mi tía Nidia y su esposo Hernando, quienes fueron mis segundos padres. Me dieron la oportunidad de estudiar, me acogieron con generosidad y abrieron las puertas de su hogar. Hasta el último momento me acompañaron en este camino, apoyándome en cada paso hacia esta meta. Los aprecio profundamente.

A una profesora muy querida, Betty, y a un padrino único como Javier, que me inspiraron a seguir adelante y a buscar la oportunidad de vivir mi historia en la Universidad Industrial de Santander, la UIS. Me mostraron que todo era posible si estaba dispuesto a intentarlo. Hicieron visible el camino hacia aquello que un día imaginé: ser ingeniero electricista.

A mis compañeros y amigos de la universidad, especialmente a aquellos que, más allá de compartir clases, aportaron a mi formación como persona. Aprendí mucho de sus historias, de sus luchas y de su alegría. Cada uno tenía sus propias facilidades y dificultades, pero juntos compartimos el mismo sueño: alcanzar el título de pregrado. Entre nosotros, hubo ayuda, apoyo mutuo y un valioso espíritu de solidaridad.

A mí mismo, por insistir incluso cuando parecía difícil. Por confiar en que debía intentarlo antes de asumir que no podía. Por el esfuerzo, la constancia, y por estar presente en cada desafío, aprendiendo, creciendo y creyendo siempre que valía la pena seguir adelante.

Yorman Andrey Güiza Mosquera

Agradecimientos

A mis padres, por su inquebrantable convicción de que la educación es la mejor herencia. Gracias por cada sacrificio silencioso, por cada día de trabajo arduo y por nunca dudar de mis capacidades. Su esfuerzo y amor construyeron los cimientos sobre los cuales hoy se levanta este logro. Este proyecto es también el reflejo de sus sueños cumplidos.

A mi hermana, por ser mi compañía constante en este camino lleno de desafíos. Su amor incondicional, su paciencia infinita y su fe en mí fueron el soporte emocional que necesitaba en los momentos más difíciles. Gracias por estar en las buenas y en las malas, por ser hogar, incluso en la distancia.

A la **Universidad Industrial de Santander**, mi alma mater, por abrirme las puertas del conocimiento y formarme no solo como ingeniero, sino como ser humano comprometido con la transformación social. Esta institución me brindó las herramientas académicas, humanas y éticas para entender que cada uno de nosotros tiene la capacidad y la responsabilidad de aportar a una sociedad más justa, equitativa y sostenible.

A mi pareja, **Angie Lizeth Barajas**, por ser mi apoyo incondicional. Tu compañía en los momentos de mayor incertidumbre, tus palabras de aliento, tu fuerza cuando la mía flaqueaba y tu fe constante en este proceso fueron fundamentales para llegar hasta aquí. Gracias por creer en mí, incluso cuando yo dudaba. Este logro también es tuyo.

Finalmente, a cada persona que, de una u otra forma, hizo parte de este proceso. Sin ustedes, este camino no habría sido posible ni tan significativo. Este trabajo no es solo un cumplimiento académico, es un homenaje a quienes me sostuvieron, me impulsaron y caminaron a mi lado.

Diego Alejandro Pérez

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios por darme la oportunidad de alcanzar este logro, por sostenerme en el camino y permitirme llegar hasta aquí para compartir estas palabras.

A mi madre, Estela Mosquera, por su amor incondicional y por su constante compromiso con mi bienestar. Cada gesto suyo, grande o pequeño, fue parte fundamental en la construcción del camino que hoy me permite alcanzar esta meta.

A mi tía Nidia y a su esposo Hernando, por ser un apoyo firme y constante. Me ofrecieron lo que solo unos verdaderos padres podrían dar: un hogar, confianza y todo lo necesario para avanzar con firmeza hacia mis metas.

A aquellas personas que, con su ayuda desinteresada, hicieron posible la culminación de este proceso. Hoy puedo mirarlos y decir con orgullo: finalmente lo logramos. Gracias por haber caminado conmigo y por formar parte de mi historia en la Universidad Industrial de Santander.

Yorman Andrey Güiza Mosquera

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Alcance y metas del trabajo de grado	16
1.1 Alcance	16
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo general	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
2. Marco referencial	18
2.1 Comunidades energéticas.....	18
2.2 Autogeneración Colectiva (AGRC) y Autogeneradores Colectivos (AC).....	18
2.3 Generación Distribuida Colectiva (GDC)	19
2.4 Autogeneración Distribuida (AGD)	19
2.5 Importancia de las comunidades energéticas en Colombia	20
3. Caracterización a la comunidad	21
3.1 Ubicación	22
3.2 Sector social de la comunidad.....	22
3.2.1 Servicios básicos	22
3.2.2 Salud y educación.....	23
3.2.3 Energía y combustibles	23
3.3 Actividades económicas y turismo	23
4. Análisis de los recursos energéticos disponibles.....	24
4.1 Energía solar fotovoltaica	24
4.2 Energía eólica	25
4.3 Energía hidráulica	25
4.4 Disponibilidad del recurso solar.....	26

4.5 Análisis de disponibilidad del recurso hídrico	26
4.6 Análisis de disponibilidad del recurso de viento	27
5. Comparativo de tecnologías de generación renovable evaluadas.....	28
6. Dimensionamiento del sistema de generación	29
6.1 Estimación de consumo energético mensual por vivienda	29
6.2. Método de dimensionamiento del sistema fotovoltaico.....	30
6.3 Espacio disponible para la instalación.....	30
6.4. Cálculo inicial del arreglo fotovoltaico.....	30
6.5. Dimensionamiento del banco de baterías	31
6.6. Selección del inversor	31
7. Análisis de rendimiento del sistema fotovoltaico mediante simulación en PVGIS.....	32
7.1 Estado de carga del banco de baterías	33
8. Análisis eléctrico del arreglo fotovoltaico.....	35
8.1 Cálculos para determinar la configuración óptima.....	35
8.4 Estructura	36
9. Análisis de costos del sistema fotovoltaico propuesto	36
10. Conclusiones	38
11. Recomendaciones	39
Referencias Bibliográficas.....	41

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Accesorios de la solución fotovoltaica	35
Tabla 2. Costos del sistema	38
Tabla 3. Generación en 20 años	39

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Simulación con 4 paneles	34
Figura 2. Estado de carga baterías a lo largo del año	35

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndices A. Visita a la Comunidad

Apéndices B. Factibilidad de la Comunidad

Apéndices C. Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico

Apéndices D. Panel solar

Apéndices E. Inversor Híbrido

Apéndices F. Batería

Apéndices G. Análisis de Costos del Sistema Fotovoltaico Propuesto

Apéndices H. Cálculo consumo

Apéndices I. Diagrama Unifilar

Glosario

Banco de baterías: conjunto de acumuladores eléctricos conectados entre sí que permiten almacenar energía para garantizar el suministro durante periodos sin generación, especialmente útil en sistemas fotovoltaicos aislados.

CAPEX (Capital Expenditure): gasto de inversión inicial requerido para la adquisición de equipos, materiales, transporte e instalación de un sistema energético.

Horas solares pico (HSP): número de horas al día con irradiancia solar equivalente a 1000 W/m², utilizado como base para calcular la generación solar.

Inversor off-grid: dispositivo que convierte la corriente continua (DC) de los paneles o baterías en corriente alterna (AC), permitiendo el uso de la energía en viviendas sin conexión a la red.

Micropilotes: elementos de cimentación de pequeño diámetro utilizados para fijar estructuras al terreno, ideales en suelos con baja compactación y con bajo impacto ambiental, comunes en zonas protegidas.

OPEX (Operational Expenditure): gasto operativo estimado durante la vida útil del sistema, que incluye mantenimiento, limpieza, inspecciones periódicas y reemplazo de componentes.

RETIE: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas de Colombia, que establece las normas de seguridad y calidad para instalaciones eléctricas en el país.

Sistema fotovoltaico aislado: sistema de generación eléctrica basado en energía solar que opera de forma independiente a la red eléctrica nacional, diseñado para zonas remotas.

String: conjunto de paneles solares conectados en serie. Esta configuración determina el voltaje total del arreglo.

Resumen

Título: Diseño de solución de generación con fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) para la comunidad “Coexistiendo con el cóndor” en el Páramo del Almorzadero*

Autores: Diego Alejandro Pérez Pérez, Yorman Andrey Güiza Mosquera**

Palabras clave: Electrificación rural, energía solar fotovoltaica, comunidades no interconectadas, transición energética, sostenibilidad ambiental.

Descripción:

La comunidad “Coexistiendo con el Cóndor”, ubicada en el Páramo del Almorzadero, municipio de Cerrito, Santander, no cuenta actualmente con acceso al servicio de energía eléctrica, situación que limita su desarrollo social, económico y educativo. Partiendo de esta necesidad, el presente proyecto propone una solución integral de electrificación basada en fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), que respeta las restricciones ambientales del ecosistema de páramo.

El estudio incluyó la caracterización energética de la comunidad, el análisis geográfico y climático del entorno, así como la evaluación de la demanda eléctrica residencial. Con base en esta información, se diseñó un sistema técnico viable que contempla generación, almacenamiento, distribución y costos asociados, apoyado en herramientas de simulación como PVGIS y normas técnicas colombianas. Esta propuesta está alineada con los objetivos de transición energética del país y busca mejorar la calidad de vida de los habitantes, fortalecer su autonomía energética y promover actividades productivas como el ecoturismo, todo ello sin comprometer la conservación ambiental del territorio.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Rolando Doctor en Ingeniería Industrial, área Ingeniería Eléctrica Codirector Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Abstract

Title: Design of a Renewable Energy Generation Solution Using Non-Conventional Sources (FNCER) for the “Coexistiendo con el Cóndor” Community in the Páramo del Almorzadero*

Authors: Diego Alejandro Pérez Pérez, Yorman Andrey Güiza Mosquera**

Keywords: Rural electrification, photovoltaic solar energy, non-interconnected communities, energy transition, environmental sustainability.

Description:

The “Coexistiendo con el Cóndor” community, located in the Páramo del Almorzadero in Cerrito, Santander, currently lacks access to electricity, which restricts its social, economic, and educational development. In response to this need, the present project proposes a comprehensive electrification solution based on non-conventional renewable energy sources (FNCER), fully aligned with the environmental restrictions of the páramo ecosystem.

The study involved an energy characterization of the community, along with geographic and climatic analysis of the area, and an evaluation of residential energy demand. Based on this data, a technically and economically feasible system was designed, covering generation, storage, distribution, and associated costs. Simulation tools such as PVGIS and national technical regulations were applied to validate the proposal. The solution supports Colombia's energy transition goals, aims to improve the quality of life of local residents, promote energy autonomy, and enable productive activities such as ecotourism without compromising environmental conservation.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Rolando Doctor en Ingeniería Industrial, área Ingeniería Eléctrica Codirector Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Introducción

En las zonas rurales de Colombia, el acceso a la energía eléctrica sigue siendo un desafío crucial que afecta la calidad de vida de miles de comunidades aisladas. Este problema es particularmente evidente en el caso de la asociación campesina "Coexistiendo con el Cóndor", ubicada en el páramo del Almorzadero, municipio del Cerrito, Santander. En esta región, habitada por ocho familias separadas por distancias significativas y carente de acceso a puntos eléctricos cercanos, la falta de electricidad limita profundamente el desarrollo socioeconómico y las actividades esenciales de sus habitantes. Desde la conservación de alimentos y la comunicación, hasta la educación y el turismo sostenible, la ausencia de energía eléctrica condiciona la vida diaria, perpetuando un ciclo de aislamiento y subdesarrollo.

Históricamente, las soluciones energéticas para comunidades rurales han enfrentado barreras geográficas, económicas y normativas que dificultan la implementación de infraestructura eléctrica convencional. Aunque en el pasado se han intentado soluciones temporales con sistemas a base de combustibles fósiles, estas alternativas resultan insostenibles desde una perspectiva económica y ambiental. En este contexto, las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) emergen como una opción viable y sostenible, adaptada a las características del páramo, que además respetan la sensibilidad ecológica de esta área protegida.

A la par con esta necesidad, Colombia ha venido fortaleciendo su marco normativo para favorecer el acceso a la energía en zonas apartadas mediante el impulso de comunidades energéticas. La Ley 1715 de 2014 y su modificación por la Ley 2099 de 2021 promueven la integración de las FNCER y la participación ciudadana en la generación y gestión de energía (Congreso de Colombia, 2014; 2021). El Decreto 2236 de 2023, además, reglamenta las figuras de Autogenerador Colectivo y Comunidad Energética, posibilitando esquemas de gestión local,

autosostenibles y adaptables a territorios con baja cobertura eléctrica (Ministerio de Minas y Energía, 2023).

De forma complementaria, el Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026 establece como prioridad la regulación de modelos de comunidades energéticas, así como la destinación de recursos públicos para su fomento, especialmente en beneficio de poblaciones vulnerables de estratos 1 y 2. Esto busca garantizar el acceso a un consumo energético básico mediante tecnologías limpias y con eficiencia en el gasto público (Departamento Nacional de Planeación, 2022).

En este marco normativo y técnico, el presente proyecto tiene como objetivo diseñar una solución integral y sostenible que garantice el acceso confiable a la energía eléctrica en esta comunidad, mediante la implementación de sistemas individuales de generación solar fotovoltaica. Este modelo, alineado con los lineamientos de autogeneración colectiva, responde a las condiciones geográficas, sociales y económicas del entorno. A través de un análisis comparativo entre tecnologías (solar, hídrica y eólica) y una evaluación técnico-económica del sistema propuesto, se establece una solución que no solo provee un servicio básico esencial, sino que también sienta las bases para un desarrollo autónomo, equitativo y en armonía con la protección ambiental del páramo.

1. Alcance y metas del trabajo de grado

1.1 Alcance

Este proyecto no contempla la implementación física del sistema de generación, dejando esta etapa para una futura aplicación. El enfoque se centra en la recopilación de información de campo, el análisis técnico, social y económico, y el diseño conceptual de una solución de generación eléctrica basada en fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) para la comunidad “Coexistiendo con el Cóndor”, ubicada en el Páramo del Almorzadero, municipio de Cerrito, Santander.

Como parte del estudio, se realiza una evaluación comparativa del potencial de tres tecnologías de generación renovable: solar fotovoltaica, minihidráulica y energía eólica. Para cada una de ellas, se analiza la disponibilidad del recurso, las condiciones geográficas y ambientales, la viabilidad técnica y la compatibilidad con las características sociales de la comunidad. Este análisis integral permite seleccionar la alternativa más adecuada y sostenible, priorizando aquella que garantice mayor confiabilidad, menor impacto ambiental y facilidad de implementación en una zona de alta sensibilidad ecológica.

De esta manera, el proyecto busca establecer las bases técnicas y sociales necesarias para una futura implementación, garantizando que la solución propuesta sea funcional, sostenible y respetuosa con el entorno natural y cultural de la comunidad beneficiaria.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar una solución para el acceso a la energía eléctrica de los usuarios pertenecientes a la asociación campesina 'Coexistiendo con el Cóndor', ubicada en el páramo del Almorzadero, basada en fuentes no convencionales de energía renovable FNCER

1.2.2 Objetivos específicos

Determinar la disponibilidad de recursos renovables y proponer diferentes alternativas de generación de energía en la comunidad, mediante un estudio de campo que incluye el levantamiento de información primaria.

Comparar las diferentes alternativas de solución propuestas considerando aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales.

Realizar el diseño detallado de la solución de generación, la red de reparto y las instalaciones de uso final de los usuarios, considerando la mejor alternativa seleccionada (memorias de cálculo, planos, presupuesto y especificaciones técnicas).

2. Marco referencial

2.1 Comunidades energéticas

Las comunidades energéticas han emergido como una alternativa innovadora y participativa en la transición energética del país, al permitir que usuarios organizados, tanto personas naturales como jurídicas, generen, gestionen y consuman su propia energía a partir de fuentes limpias. En Colombia, este concepto ha sido formalmente incorporado mediante el Decreto 2236 de 2023 expedido por el Ministerio de Minas y Energía, el cual establece el marco normativo para su implementación (MinMinas, 2023).

2.2 Autogeneración Colectiva (AGRC) y Autogeneradores Colectivos (AC)

Dentro del decreto, se establece que la Autogeneración Colectiva (AGRC) es la actividad mediante la cual los miembros de una comunidad energética producen energía principalmente para cubrir sus necesidades internas. Esta producción puede provenir de sistemas solares, eólicos, hidroeléctricos u otras tecnologías basadas en Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER). En caso de existir excedentes, estos pueden ser entregados a la red bajo regulación de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) (CREG, 2023).

Los Autogeneradores Colectivos (AC) son los usuarios integrantes de una comunidad energética que participan activa y coordinadamente en el proceso de autogeneración. Según UPME (2024), este modelo favorece la disminución de costos energéticos, fortalece la seguridad del suministro, y promueve la apropiación tecnológica por parte de la ciudadanía.

2.3 Generación Distribuida Colectiva (GDC)

La Generación Distribuida Colectiva (GDC), también contemplada en el Decreto 2236, se refiere a los proyectos en los que la comunidad genera energía cerca de los puntos de consumo y los conecta a un Sistema de Distribución Local (SDL) o a una microred. Este modelo es clave para comunidades rurales como “Coexistiendo con el Cóndor”, ya que permite reducir pérdidas por transmisión y proporciona independencia energética en zonas no interconectadas (IDEAM & MinEnergía, 2023).

Este tipo de generación se articula con la normativa de calidad del servicio y tarifas, la cual será desarrollada por la CREG en un plazo posterior a la entrada en vigor del decreto. Las comunidades podrán incluso comercializar los excedentes, promoviendo su sostenibilidad financiera a largo plazo (CREG, 2023).

2.4 Autogeneración Distribuida (AGD)

Por último, la Autogeneración Distribuida (AGD) es un esquema que permite a un usuario generar su propia energía y utilizarla en el mismo sitio o en uno cercano, sin necesidad de conexión con grandes redes. Puede realizarse de forma individual o colectiva, y se convierte en una herramienta estratégica para zonas no interconectadas donde las restricciones geográficas y ambientales impiden el acceso a la red nacional.

Este modelo se encuentra respaldado por la Ley 1715 de 2014, modificada por la Ley 2099 de 2021, que promueve la participación activa de la ciudadanía en el desarrollo de sistemas de energía renovable descentralizados (Congreso de Colombia, 2021). Además, el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 establece el impulso a comunidades energéticas con apoyo financiero y técnico, priorizando a poblaciones de estratos 1 y 2 (DNP, 2023).

En conjunto, estos marcos normativos constituyen un soporte integral para la estructuración de comunidades energéticas como solución viable para alcanzar la cobertura eléctrica en territorios apartados, aprovechando los recursos locales de forma sostenible y comunitaria.

2.5 Importancia de las Comunidades Energéticas en Colombia

La implementación de comunidades energéticas en Colombia representa un paso clave hacia la equidad energética, especialmente en zonas rurales, aisladas o no interconectadas. Estos esquemas permiten que personas naturales o jurídicas participen activamente en la generación, consumo, gestión y comercialización de energía mediante fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), combustibles renovables y recursos distribuidos. Este modelo fortalece la autonomía energética, reduce la dependencia de redes centralizadas y contribuye a mitigar el cambio climático.

Según la Metodología General para la Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas (Ministerio de Minas y Energía, 2024), estas comunidades son herramientas esenciales para enfrentar la pobreza energética, promoviendo una gestión participativa, solidaria y sostenible. Se proponen modelos como la Autogeneración Colectiva, la Generación Distribuida Colectiva y la Autogeneración Distribuida, adaptados a las condiciones sociales y técnicas de cada territorio. Algunos modelos incluso permiten inyectar excedentes a la red, generando ingresos adicionales, y se articulan con políticas públicas de inclusión, equidad y participación ciudadana (Ministerio de Minas y Energía, 2024, pp. 10–12).

El Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026 respalda esta estrategia al establecer lineamientos normativos y destinar recursos públicos para comunidades vulnerables. Las comunidades energéticas también ayudan a cerrar brechas regionales en infraestructura

eléctrica, fomentan el desarrollo de capacidades locales y permiten una transición energética justa.

En casos como el de “Coexistiendo con el Cóndor”, donde las condiciones geográficas y ambientales restringen el acceso a redes tradicionales, estos modelos ofrecen soluciones resilientes, descentralizadas y adaptadas al territorio. Aseguran servicios básicos y amplían oportunidades en salud, educación, economía local y conservación ambiental.

3. Caracterización a la Comunidad

Con el objetivo de conocer directamente las condiciones de la comunidad “Coexistiendo con el Cóndor”, ubicada en el Páramo del Almorzadero, se realizó una visita técnica al territorio. Durante la jornada se evidenciaron limitaciones estructurales como la falta total de servicio eléctrico, el aislamiento geográfico, el clima extremo y la escasa conectividad vial. Estas condiciones han limitado el desarrollo social y económico, afectando la conservación de alimentos, la educación, el acceso a la información y el ecoturismo, principal actividad productiva del área.

Durante la visita se entabló un diálogo con los habitantes y se aplicaron encuestas estructuradas a las familias, recolectando datos sobre hábitos de consumo, uso de equipos eléctricos, actividades económicas y percepción del acceso a la energía. Esta información social fue clave para diseñar una solución energética adaptada a su realidad.

También se hizo reconocimiento físico del terreno para ubicar áreas óptimas para la instalación de paneles solares, considerando orientación, sombras, vegetación y pendientes. Asimismo, se evaluaron las fuentes hídricas y las condiciones ambientales para determinar la

viabilidad de otras fuentes como la eólica o hidráulica. Las imágenes y resultados de las encuestas aplicadas están disponibles en el apéndice A.

3.1 Ubicación

La comunidad "Coexistiendo con el Cóndor" está ubicada en la vereda Boyago, sector Mortiño, dentro del páramo del Almorzadero, municipio del Cerrito, Santander, a una altitud entre 3,500 y 4,000 msnm, en un ecosistema estratégico para la conservación hídrica y ambiental. Su área de influencia es de 2.3 km², con viviendas dispersas, algunas hasta 3 km de la vía principal.

El acceso es limitado: se recorre una vía sin pavimentar de 16 km desde el casco urbano, y el ingreso final a pie o a caballo. La comunidad se encuentra dentro del páramo de Santurbán, zona protegida donde nacen fuentes hídricas como el río Servitá, lo que restringe el uso de infraestructura eléctrica convencional, pese al potencial hidroeléctrico de la región.

3.2 Sector social de la comunidad

3.2.1 Servicios básicos

La comunidad cuenta con agua proveniente de nacientes naturales de la zona, lo que resalta el potencial hídrico del territorio. Sin embargo, el agua no es potable y no se cuenta con un sistema de tratamiento adecuado. Cada vivienda dispone de un pozo séptico para el manejo de aguas residuales, pero no existe un sistema de alcantarillado, lo que representa un desafío en términos de saneamiento básico y salud pública.

3.2.2 Salud y educación

Los habitantes de la comunidad deben trasladarse hasta el casco urbano del municipio del Cerrito para recibir atención médica, recorriendo aproximadamente 16 km en un tiempo estimado de una hora. La falta de infraestructura vial adecuada y la ausencia de transporte público dificultan el acceso oportuno a los servicios de salud, lo que supone un riesgo en casos de emergencia.

En cuanto a educación, no existe una institución educativa dentro de la comunidad. Los niños deben desplazarse durante una hora caminando hasta la escuela más cercana, ubicada en una vereda adyacente. La falta de acceso a electricidad y telecomunicaciones también dificulta el aprendizaje, ya que impide el uso de herramientas digitales o iluminación adecuada para el estudio en horas nocturnas.

3.2.3 Energía y Combustibles

Actualmente, la comunidad no cuenta con acceso a energía eléctrica. Para la cocción de alimentos, algunas familias utilizan cilindros de GLP, mientras que otras recurren a desechos vegetales recolectados en los alrededores. En cuanto a la iluminación, los hogares dependen de velas y lámparas recargables con pequeños paneles solares, lo que limita su autonomía energética y calidad de vida.

3.3 Actividades Económicas y Turismo

La comunidad basa su economía principalmente en la ganadería bovina y el cultivo de papa. Además, el turismo ecológico ha ganado importancia gracias a la presencia de cóndores andinos y lagunas naturales, atrayendo visitantes interesados en el ecoturismo. Tres viviendas

están habilitadas para brindar hospedaje y alimentación, mientras que el resto de familias apoya como guías turísticos. La promoción se realiza mediante redes sociales y el voz a voz.

4. Análisis de los Recursos Energéticos Disponibles

4.1 Energía Solar Fotovoltaica

La radiación solar es uno de los recursos más aprovechables en la comunidad, con un promedio de 3.3 Horas Solar Pico (HSP) en el mes más crítico, lo cual permite implementar sistemas fotovoltaicos con baterías. La ubicación geográfica, con vegetación baja y escasa, junto a un relieve sin pendientes pronunciadas, favorece la captación solar sin sombras significativas.

El uso de sistemas individuales por vivienda evita la necesidad de redes de distribución extensas, lo que reduce costos y protege el ecosistema del páramo. Además, los sistemas fotovoltaicos modulares permiten futuras ampliaciones por parte de los hogares según sus necesidades. (IEA, 2020)

Las temperaturas frías del páramo también resultan beneficiosas, ya que aumentan la eficiencia de los módulos solares al disminuir la resistencia interna de los materiales. (IRENA, 2019)

Sin embargo, se requiere protección adecuada contra humedad y condensación, garantizada mediante componentes certificados bajo normas internacionales como la IEC 61215 para módulos y la IEC 62109 para inversores. (IEC, 2021)

4.2 Energía Eólica

La energía eólica representa una alternativa renovable que aprovecha el movimiento del viento mediante aerogeneradores para generar electricidad. Su efectividad ha sido comprobada en regiones con regímenes de viento estables y sin obstrucciones que afecten el flujo del aire. (IEA, 2022)

En la comunidad “Coexistiendo con el Cóndor”, ubicada en un valle rodeado de montañas, la presencia de turbulencias reduce la velocidad y constancia del viento, factores determinantes para la viabilidad del sistema. Se requieren velocidades sostenidas mínimas de 3 a 4 m/s para operar, y superiores a 6 m/s para un rendimiento óptimo, condiciones que no se han verificado debido a la falta de mediciones locales. (IRENA, 2020)

La generación eólica también presenta retos por su intermitencia diaria y estacional, lo que obliga a contar con sistemas de respaldo. Además, en ecosistemas de páramo, su instalación implica restricciones normativas y posibles impactos negativos en el paisaje y en la fauna, especialmente sobre especies vulnerables como el cóndor andino. (WWF, 2021)

4.3 Energía Hidráulica

El río Servitá presenta una cascada de 250 m dividida en tres fases, lo que ofrece un perfil favorable para generación hidroeléctrica. No obstante, su cercanía al nacimiento del cauce implica un caudal reducido, lo que limita la potencia aprovechable. Según IRENA (2015), proyectos de pequeña escala dependen críticamente de la constancia del caudal para operar de forma continua.

Adicionalmente, el río se encuentra en una zona de páramo, lo cual restringe cualquier intervención por normativas ambientales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

La instalación de infraestructura eléctrica para distribuir la energía generada requeriría atravesar terrenos protegidos, lo que implica trámites complejos y altos costos.

Aunque las microcentrales hidroeléctricas podrían adaptarse a estas condiciones, su implementación técnica y económica presenta retos significativos. De acuerdo con (UNIDO, 2016), estos sistemas pueden ser sostenibles, pero los altos costos iniciales y barreras regulatorias limitan su aplicación en comunidades remotas.

4.4 Disponibilidad del Recurso Solar

La energía solar se identificó como la fuente renovable más viable para electrificar la comunidad “Coexistiendo con el Cóndor”. El análisis del recurso solar, basado en datos de Power NASA, PVGIS, SolarGIS, Atlas Solar de Colombia e IDEAM, mostró una irradiación horizontal global promedio de 1673.8 kWh/m²/año y un valor óptimo de irradiación global inclinada (GTI opta) de 1707.8 kWh/m²/año, con un ángulo óptimo de inclinación de 11°.

Las HSP varían estacionalmente entre 2.72 y 5 horas, por lo que se requiere un adecuado sistema de almacenamiento. Las condiciones climáticas del páramo (8 °C a 14 °C) favorecen la eficiencia fotovoltaica, aunque la alta nubosidad aumenta la dependencia de la radiación difusa. Aun así, se confirma la viabilidad técnica de la energía solar para esta zona. La información está disponible en el apéndice B Estudio de factibilidad: recurso solar.

4.5 Análisis de Disponibilidad del Recurso Hídrico

El río Servitá, presente en la zona de estudio, presenta características hidrológicas con potencial para generación hidroeléctrica, como una cascada de aproximadamente 250 m de caída dividida en tres tramos. Sin embargo, su morfología no completamente vertical reduce la eficiencia del aprovechamiento. Además, aunque el caudal estimado permitiría cierta capacidad

de generación, la ubicación en ecosistema de páramo protegido por la Ley 1930 de 2018 impide cualquier intervención directa en el cauce.

Adicionalmente, la distancia entre el punto de generación y las viviendas (hasta 3 km en un área de 2.3 km²) representa un reto técnico y logístico considerable, lo que hace inviable esta opción frente a otras alternativas renovables.

4.6 Análisis de Disponibilidad del Recurso de Viento

El aprovechamiento de la energía eólica exige velocidades de viento adecuadas. Según el CENER y la WWEA, se requiere un mínimo de 3–4 m/s para que los aerogeneradores inicien operación, y más de 5 m/s para una generación eficiente a alturas de 10–30 metros. En la comunidad “Coexistiendo con el Cóndor”, se registró una velocidad media de 4.89 m/s a 10 m y de 3.5 m/s a 5 m, lo que permite operar turbinas de baja potencia, pero con eficiencia limitada debido a la variabilidad estacional y condiciones topográficas.

El viento más fuerte se presenta solo en junio y julio, lo que obliga a incluir almacenamiento energético o fuentes complementarias, aumentando los costos y complejidad. Además, la instalación de aerogeneradores representa un riesgo ambiental, especialmente por la posible afectación al cóndor andino, especie protegida presente en la zona. Diversos estudios (SEO/BirdLife, UICN) advierten del impacto negativo de las turbinas sobre aves planeadoras de gran envergadura.

Toda la información técnica detallada está contenida en el apéndice B Estudio de factibilidad: disponibilidad de vientos.

5. Comparativo de Tecnologías de Generación Renovable Evaluadas

Para seleccionar la fuente de generación más adecuada para la comunidad "Coexistiendo con el Cóndor", se llevó a cabo un análisis comparativo entre tecnologías solares, hidráulicas y eólicas, considerando aspectos técnicos, ambientales, logísticos y normativos. Esta evaluación respondió a las condiciones particulares del páramo del Almorzadero, donde el acceso es limitado, las restricciones ambientales son estrictas y no existen infraestructuras previas que faciliten una solución centralizada.

La evaluación incluyó criterios como accesibilidad, infraestructura requerida, invasividad, impacto ambiental, tipo de instalación, mantenimiento, área utilizada, costo inicial, autonomía energética y requerimientos regulatorios. Se utilizaron colores para clasificar cada tecnología: verde para criterios favorables, naranja para condiciones medias o con limitaciones, y rojo para aquellos que implican restricciones significativas. El sistema solar fotovoltaico resultó favorable en la mayoría de criterios, destacando por su modularidad, bajo impacto ambiental y facilidad de mantenimiento.

En contraste, la generación hidráulica fue descartada por requerir intervención en fuentes hídricas, lo cual está prohibido en áreas de páramo, además de implicar obras de gran escala. La opción eólica presentó viabilidad media, pero enfrenta limitaciones debido a la variabilidad del viento, el impacto potencial sobre la fauna y la necesidad de estructuras de gran tamaño que alteran el paisaje y requieren permisos ambientales. En conclusión, la solución solar fotovoltaica, por su adaptabilidad, menor invasividad y posibilidad de implementación por vivienda, se considera la alternativa más viable y sostenible para esta comunidad.

Toda esta información y la tabla comparativa correspondiente se encuentran en el apéndice B del documento.

6. Dimensionamiento del Sistema de Generación

6.1 Estimación de consumo energético mensual por vivienda

La comunidad está compuesta por ocho viviendas de estrato 1 con un total de 38 habitantes. Cuatro de estas viviendas ofrecen servicios de hospedaje, lo cual genera variaciones en la demanda energética a lo largo del año. Actualmente, ninguna cuenta con acceso a energía eléctrica, lo que limita el desarrollo social y económico. Por ello, se realizó un análisis del consumo energético esperado por hogar, considerando necesidades básicas como iluminación, conservación de alimentos, comunicación y uso de electrodomésticos esenciales.

El cálculo de la demanda se basa en la caracterización de los equipos presentes en cada vivienda y sus patrones de uso. Esta información, que constituye la base para el dimensionamiento energético del sistema fotovoltaico, se encuentra detallada en el apéndice B — Estudio de factibilidad. El análisis se complementó con la Resolución 355 de 2004, que establece un consumo mínimo de 130 kWh/mes para viviendas por encima de los 1.000 msnm (Comisión de Regulación de Energía y Gas [CREG], 2004). Según los resultados, el consumo estimado varía entre 142 y 180 kWh/mes, en función del número de habitantes y si la vivienda presta servicios turísticos.

6.2. Método de Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico

Para dimensionar el sistema fotovoltaico, se empleó un enfoque basado en la potencia mínima necesaria para cubrir el consumo diario, calculado a partir del promedio mensual de 170 kWh por hogar. Este valor se dividió entre 30 días y las 3.3 HSP del sitio, obteniendo así la potencia requerida por hora de sol.

Este método, adecuado para sistemas aislados, permite diseñar una solución uniforme y efectiva para cada vivienda. Los cálculos completos se encuentran en el apéndice C — Dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

6.3 Espacio Disponible para la Instalación

En la comunidad del páramo del Almorzadero se optó por sistemas fotovoltaicos individuales por vivienda debido a restricciones ambientales. Aunque algunas cubiertas son aptas, se priorizó la instalación a nivel del suelo, aprovechando el espacio disponible y las condiciones favorables de baja vegetación y mínima sombra. Esta solución facilita el mantenimiento, reduce riesgos estructurales y contempla el uso de micropilotes y cerramientos para proteger la infraestructura.

6.4. Cálculo Inicial del Arreglo Fotovoltaico

Como parte del dimensionamiento inicial del sistema solar fotovoltaico, y basándose en el consumo energético mensual estimado por vivienda (170 kWh/mes), se determinó que cada hogar de la comunidad requiere tres (3) paneles solares de 615 W de potencia nominal.

Este dimensionamiento preliminar servirá como punto de partida, y aún debe evaluarse la eficiencia real del sistema. Para ello, se realizará una simulación detallada en la plataforma PVGIS, que permitirá analizar el cumplimiento de este primer cálculo bajo las condiciones climáticas y geográficas específicas de la zona.

6.5. Dimensionamiento del Banco de Baterías

Para cubrir el consumo diario estimado de 5.66 kWh por vivienda y garantizar una autonomía de un día con una profundidad de descarga del 50 %, se definió una capacidad mínima de almacenamiento de 11.32 kWh. Tras evaluar configuraciones a 24 V y 48 V con baterías de 12 V y 300 Ah, se eligió la de 48 V por su mayor eficiencia y menores pérdidas eléctricas.

La configuración final consta de dos ramas en paralelo con cuatro baterías en serie cada una, resultando en un banco de 48 V y 600 Ah, con una capacidad útil de 14.4 kWh, superando el mínimo requerido. Todos los cálculos y detalles de esta selección se encuentran en el apéndice C.

6.6. Selección del Inversor

Para el sistema fotovoltaico aislado diseñado, se seleccionó el inversor PV30-2KW LMPK, compatible con el banco de baterías de 48 V conformado por ocho baterías de 12 V y 300 Ah (4S2P). Este inversor de onda senoidal pura garantiza una calidad de energía adecuada para equipos sensibles y cubre con eficiencia el consumo estimado por hogar (170 kWh/mes).

Su integración con controlador MPPT optimiza la captación solar, reduce costos y simplifica la instalación. Con una potencia nominal de 2 kW, ofrece una solución técnica confiable, adaptada a las condiciones rurales del proyecto. La ficha técnica se encuentra en el apéndice E.

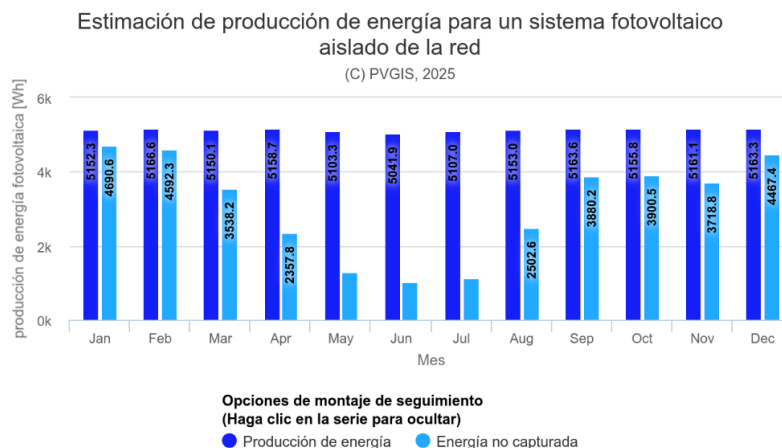
7. Análisis de Rendimiento del Sistema Fotovoltaico Mediante Simulación en PVGIS

Para validar el sistema fotovoltaico diseñado para la comunidad “Coexistiendo con el Cóndor”, se realizó una simulación técnica en la plataforma PVGIS, desarrollada por la Comisión Europea. Esta herramienta permite estimar el rendimiento energético de sistemas solares según las condiciones locales, confirmando si la potencia instalada cubre el consumo diario estimado de 5.66 kWh por vivienda en el entorno climático del páramo del Almorzadero. Todo lo relacionado con el dimensionamiento del sistema y los resultados de la simulación se encuentra detallado en el apéndice C.

Una primera evaluación con tres paneles solares (1.845 Wp) mostró limitaciones importantes: en meses de baja irradiancia como mayo y junio, la generación fue insuficiente para cubrir los 170 kWh mensuales por vivienda. Además, el sistema operaba al límite durante gran parte del año, sin margen para condiciones adversas o aumentos de consumo, lo que compromete la confiabilidad en un contexto aislado.

Figura 1.

Simulación con 4 paneles



En la imagen anterior se evidencia una mejora significativa con cuatro paneles por vivienda, alcanzando una potencia de 2.46 kWp. La simulación en PVGIS muestra un promedio anual de generación de 5.134 kWh/día, suficiente incluso en los meses más críticos. Esta configuración asegura un suministro confiable y mejora el estado de carga del banco de baterías, reduciendo el riesgo de agotamiento.

7.1 Estado de Carga del Banco de Baterías

La Figura 3 muestra el estado de carga anual del banco de baterías de 48 V–600 Ah asociado a un sistema de cuatro paneles solares de 615 W, donde se observa que durante los meses de alta irradiación las baterías alcanzan su carga máxima en más del 90 % de los días, mientras que en meses críticos como junio este valor disminuye al 63 %. Este comportamiento destaca la necesidad de implementar estrategias de eficiencia energética en periodos de menor radiación. Por su parte, la tabla siguiente presenta la configuración definitiva del sistema fotovoltaico por vivienda, establecida con base en el análisis de consumo, condiciones climáticas y simulaciones técnicas, lo cual garantiza una solución energética confiable, autónoma y adaptada a un entorno completamente aislado de la red.

Figura 2.

Estado de carga baterías a lo largo del año

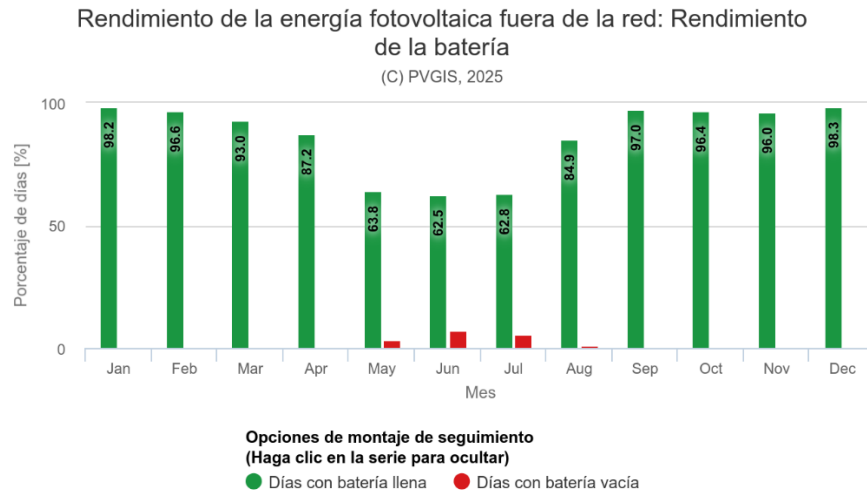


Tabla 1.

Accesorios de la solución fotovoltaica

Cantidad	Descripción	Marca	Potencia
4	Paneles solares	TRINA SOLAR	615W
1	Inversor híbrido	MUST	2Kw
8	Baterías de gel	TENSITE	12V ; 300 Ah

La información técnica de los componentes seleccionados se encuentra en los apéndice D, E y F, donde se incluyen las fichas del panel Trina Solar, el inversor híbrido MUST y las baterías de gel Tensite. Estos documentos respaldan la compatibilidad y el desempeño adecuado del sistema bajo las condiciones del proyecto.

8. Análisis Eléctrico del Arreglo Fotovoltaico

Para garantizar una operación segura y eficiente del sistema fotovoltaico, se realizó un análisis eléctrico que valida la compatibilidad entre los módulos solares seleccionados y el inversor híbrido con controlador de carga integrado. Esta evaluación considera los límites de voltaje, corriente y potencia admisibles, asegurando un diseño que maximiza el aprovechamiento energético y prolonga la vida útil del sistema. Las características eléctricas del panel solar y del inversor utilizado se encuentran detalladas en los apéndice D y E, respectivamente.

8.1 Cálculos para Determinar la Configuración Óptima

Para determinar la configuración eléctrica óptima del sistema fotovoltaico, se analizaron las especificaciones técnicas del inversor off-grid Must PV30-2KW LMPK y de los paneles Trina Solar de 615 W. El objetivo fue asegurar que la operación del sistema se mantuviera dentro de los límites de voltaje, corriente y potencia definidos por los fabricantes.

Con base en este análisis, cuyos cálculos se encuentran en el Apéndice 3, se definió lo siguiente:

- Máximo de paneles en serie: 3 (sin exceder el voltaje en circuito abierto permitido).
- Máximo de cadenas en paralelo: 4 (sin superar la corriente máxima de entrada del controlador MPPT).
- Máximo de paneles por potencia: 4 (para no exceder los 2500 W de capacidad del inversor).

Considerando estos límites, se adoptó una configuración 2S2P (dos paneles en serie por dos en paralelo), equivalente a cuatro módulos por vivienda. Esta configuración asegura

eficiencia, seguridad y facilidad de instalación, cumpliendo con todas las restricciones técnicas del sistema.

8.4 Estructura

Para la instalación de los paneles solares sobre el terreno natural cubierto de pasto, se optó por el uso de micropilotes, una solución eficiente y adecuada para suelos de baja compactación, acceso limitado y restricciones ambientales. Estos elementos, de pequeño diámetro (100 a 300 mm), permiten transferir las cargas a capas profundas del suelo mediante fricción o punta, soportando tanto esfuerzos de compresión como de tensión.

Su instalación requiere equipos livianos, genera pocas vibraciones y reduce el impacto ambiental, características clave en ecosistemas protegidos como el páramo. Además, ofrecen una alternativa económica, rápida y de bajo impacto, facilitando la construcción sin necesidad de maquinaria pesada ni excavaciones extensas.

9. Análisis de Costos del Sistema Fotovoltaico Propuesto

Para evaluar la viabilidad del sistema fotovoltaico aislado propuesto para la comunidad “Coexistiendo con el Cóndor”, se realizó un análisis técnico y económico que abarca la inversión inicial (CAPEX) y los costos operativos a 20 años (OPEX), cuyos detalles se encuentran en el apéndice G .

El CAPEX, de \$24.940.000 COP por vivienda, cubre la adquisición de cuatro paneles de 615 W, inversor híbrido de 2 kW con MPPT, banco de ocho baterías de 12 V – 300 Ah, estructuras con micropilotes, protecciones, cableado, transporte e instalación.

El OPEX, estimado en \$47.200.000 COP, contempla mantenimiento anual, revisión del sistema y el reemplazo del banco de baterías cada seis años, asegurando la operación continua y eficiente del sistema durante su vida útil.

Tabla 2.

Costos del sistema

CAPEX	\$ 24.940.000
OPEX	\$ 47.200.000
COSTO TOTAL	\$ 72.140.000

Tabla 3.

Generación en 20 años

GENERACION MENSUAL (KwH)	GENERACION ANUAL (KwH)	GENERACION 20 AÑOS (KwH)
170	2.040	40.800

En términos de viabilidad económica, se calculó un costo nivelado de energía de \$1.768 COP/kWh durante 20 años, lo cual resulta competitivo frente a otras fuentes aisladas como plantas diésel y ofrece estabilidad frente a variaciones del mercado. Además, el costo por kWp instalado fue de \$10.138.211 COP, un valor acorde con sistemas implementados en zonas rurales de difícil acceso debido a los mayores costos logísticos y de instalación.

10. Conclusiones

El desarrollo del presente proyecto ha permitido demostrar la viabilidad técnica, económica y social de implementar un sistema de generación eléctrica basado en fuentes no convencionales de energía renovable para la comunidad “Coexistiendo con el Cóndor”. A partir de un análisis detallado del contexto geográfico, climático y social del Páramo del Almorzadero, se identificó que la energía solar fotovoltaica representa la opción más adecuada para cubrir las necesidades energéticas básicas de los hogares, en coherencia con las restricciones ambientales del ecosistema de páramo.

El diseño propuesto, fundamentado en simulaciones, normas técnicas y condiciones reales de la comunidad, permite garantizar un suministro energético confiable, limpio y autónomo. Además, la evaluación de costos a lo largo de la vida útil del sistema demuestra que, pese a una inversión inicial significativa, los beneficios a largo plazo superan ampliamente los costos, tanto en términos económicos como sociales y ambientales.

Con la implementación de esta solución, se espera mejorar sustancialmente la calidad de vida de los habitantes, al facilitar la conservación de alimentos, el acceso a la información y la educación, el desarrollo de actividades productivas como el ecoturismo y la participación activa en procesos de transición energética justa. Asimismo, se fortalece la resiliencia de la comunidad frente a la exclusión energética, promoviendo la equidad y el arraigo en el territorio mediante el uso sostenible de los recursos naturales disponibles.

11. Recomendaciones

Durante el desarrollo del trabajo de grado se identificaron aspectos técnicos, logísticos y sociales que, aunque fueron considerados en el diseño, no pudieron ser abordados en profundidad debido a limitaciones de tiempo, recursos y alcance. Estas recomendaciones buscan servir como base para trabajos posteriores, tanto en investigación como en implementación práctica, contribuyendo a la sostenibilidad y mejora continua del sistema.

En primer lugar, se sugiere la realización de estudios complementarios de monitoreo en tiempo real del sistema fotovoltaico, con el fin de evaluar su desempeño bajo condiciones reales de operación. Esto permitiría identificar variaciones en la generación de energía, estados de carga de las baterías y posibles necesidades de ajustes técnicos. Asimismo, se recomienda analizar la viabilidad de incorporar tecnologías híbridas, como pequeños aerogeneradores o sistemas de respaldo con biocombustibles, que puedan garantizar un suministro continuo en los meses de menor radiación solar.

Desde un punto de vista social y comunitario, se plantea la necesidad de fortalecer las capacidades locales en mantenimiento y operación del sistema, mediante programas de capacitación técnica a los habitantes, de forma que se garantice la autonomía y sostenibilidad a largo plazo. Igualmente, sería valioso implementar estrategias de educación energética, enfocadas en el uso eficiente y responsable de la electricidad, maximizando la vida útil de los equipos y reduciendo costos operativos.

En el ámbito económico, una línea de trabajo recomendada es el análisis de modelos de financiación y cooperación, que permita a la comunidad acceder a recursos estatales, programas de energías renovables o alianzas con empresas privadas para optimizar la inversión inicial. Además, se podrían evaluar estrategias de comercialización de excedentes energéticos o

proyectos productivos ligados al turismo sostenible, aprovechando la disponibilidad de energía como un motor de desarrollo económico local.

Finalmente, se invita a considerar la evolución tecnológica y regulatoria en energías renovables, ya que las tendencias actuales apuntan a sistemas más eficientes, con menores costos y nuevas modalidades de almacenamiento. El seguimiento a estos avances permitirá mantener actualizado el diseño y, de ser necesario, incorporar mejoras que aseguren la competitividad y viabilidad de la solución a largo plazo.

Referencias Bibliográficas

BirdLife International. (2019). *Wind energy and biodiversity: Guidance for impact assessment*.

<https://www.birdlife.org>

Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2023). *Boletín Normativo - Regulación en*

Comunidades Energéticas. <https://www.creg.gov.co>

Congreso de Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014 – Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional*.

Congreso de Colombia. (2021). *Ley 2099 de 2021 – Por la cual se modifica la Ley 1715 de 2014 y se dictan otras disposiciones*. <https://www.funcionpublica.gov.co>

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2022). *Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026:*

Colombia, potencia mundial de la vida. <https://www.dnp.gov.co>

IDEAM & Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Atlas del Potencial Energético Renovable de*

Colombia. <https://www.minenergia.gov.co>

International Electrotechnical Commission (IEC). (2021). *IEC 61215:2021 – Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval*. <https://www.iec.ch>

International Electrotechnical Commission (IEC). (2021). *IEC 62109-1: Safety of power converters for use in photovoltaic power systems*. <https://www.iec.ch>

International Energy Agency (IEA). (2020). *Photovoltaic Power Systems Technology and Applications*. IEA PVPS. <https://iea-pvps.org/key-topics/>

International Energy Agency (IEA). (2022). *Wind Electricity*. IEA.

<https://www.iea.org/reports/wind-electricity>

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2019). *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects*.

<https://www.irena.org/publications>

- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). *Wind energy: A key player in the transition to a sustainable energy future*. <https://www.irena.org/publications>
- IRENA. (2015). *Small-scale hydropower*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Lineamientos para la gestión integral de los páramos*. Gobierno de Colombia. <https://www.minambiente.gov.co>
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Decreto 2236 de 2023 – Por el cual se reglamentan las comunidades energéticas en Colombia*. <https://www.minenergia.gov.co>
- Ministerio de Minas y Energía. (2024). *Metodología General para la Estrategia Nacional de Comunidades Energéticas*. <https://www.minenergia.gov.co>
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2024). *Lineamientos para la implementación de Comunidades Energéticas en Colombia*. <https://www.upme.gov.co>
- UNIDO. (2016). *Small hydropower development report 2016*. United Nations Industrial Development Organization. <https://www.unido.org/resources>
- World Wide Fund for Nature (WWF). (2021). *Renewable Energy and Biodiversity in Colombia: Guidelines for Responsible Development*. <https://www.wwf.org.co>