Diseño de una solución de generación con fuentes no convencionales de energía renovable en Asociación Campesina de Alto Jordán, Vélez, Santander

Johan Sneider Santamaria Herreño

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electricista

Director
Rolando Andrés Saravia Rincón
MBA. Magíster en Dirección de Empresas

Codirector
Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga
PhD en Tecnología

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Ingeniería Eléctrica
Bucaramanga
2026

Dedicatoria

Primeramente, dedico este triunfo a Dios, por darme la oportunidad de estudiar en una universidad de tanta excelencia como la Universidad Industrial de Santander (UIS), y por brindarme la fortaleza necesaria para continuar incluso en los momentos más difíciles.

A mis padres, Elsa Herrero Jerez y Gonzalo Santamaría, por estar presentes cuando más los necesité, por su apoyo y por acompañarme a lo largo de este camino. Este logro también es de ustedes, porque detrás de cada paso hubo motivos para seguir adelante y razones para no rendirme.

A toda mi familia, dedico este triunfo como una muestra de que los sueños sí se pueden alcanzar, sin importar lo difícil que sea el camino. Que este logro sea una motivación para creer en sus capacidades, luchar por sus metas y recordar que, con esfuerzo, perseverancia y fe, es posible salir adelante.

Finalmente, me dedico este logro a mí mismo, porque sé cuánto me costó llegar hasta aquí, los obstáculos que tuve que enfrentar y los momentos en los que continuar no fue fácil. Lo hago también porque tengo claro que este no es el final, sino el comienzo de nuevos retos y oportunidades para seguir creciendo.

A Dios, a mis padres, a mi familia y a mí mismo: gracias, gracias y gracias. Este triunfo representa mucho más que la culminación de una etapa académica; representa una historia de esfuerzo, sacrificio, esperanza y perseverancia.

Agradecimientos

Agradezco de manera incondicional a mi novia, Luisa Fernanda Vanegas Mejía, por ser mi compañía en los días más oscuros, cuando llegué a pensar que no lo lograría. Gracias por ser el motor que me impulsó a continuar en este viaje, por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba y por enseñarme que, a pesar de las dificultades, sí es posible alcanzar los sueños. Gracias por caminar a mi lado y por ser una parte tan importante de este logro. Te amo.

A mi familia, gracias por cada ayuda, por su apoyo y por estar presente en diferentes momentos de este proceso. Cada aporte fue valioso para continuar avanzando y llegar hasta aquí.

A mis amigos Nicolás, Santiago y César, gracias por enseñarme el verdadero significado de la amistad, por los momentos compartidos, las experiencias vividas y por hacer de esta aventura una etapa inolvidable. Me llevo conmigo cada recuerdo y la alegría de saber que esta historia no termina aquí, porque todavía nos esperan muchas experiencias y metas por alcanzar juntos.

A mis profesores y al personal administrativo de la Universidad Industrial de Santander (UIS), gracias por sus enseñanzas, su orientación y por contribuir a mi crecimiento académico y personal. Gracias por mostrarme el valor de pertenecer a esta institución y por hacer parte de mi formación como profesional y como persona.

Hoy culminamos una etapa de muchas que vendrán, con la satisfacción de haber recorrido un camino lleno de aprendizajes, desafíos y momentos que siempre llevaré en mi memoria. A cada persona que hizo parte de esta aventura, que me brindó una mano, una palabra de aliento o una razón para seguir adelante, muchas gracias por acompañarme y ser parte de esta historia.

Tabla de Contenido

Pág.

Introducción 12
1. Objetivos y Alcances 14
1.1. Alcance del proyecto de grado 14
1.2. Objetivo General 14
1.3. Objetivos Específicos 14
2. Marco referencial 15
2.1. Marco normativo de las comunidades energéticas 15
2.2. Autogeneración y generación distribuida 16
2.3. Fuentes no convencionales de energía renovable 16
2.4. Sistemas solares fotovoltaicos conectados a red 17
2.5. Reglamento técnico y requisitos de conexión 18
2.6. Medición y entrega de excedentes 18
2.7. Criterios técnicos para el diseño 19
3. Caracterización de la zona de estudio 19
3.1. Ubicación 20
3.2. Organización de la comunidad 20
3.3. Sector social 21
3.4. Sector económico 21
3.5. Análisis de la demanda 22
3.6. Caracterización de la infraestructura eléctrica 23
3.7. Fronteras comerciales 24
3.8. Tarifas de energía 24
3.9. Caracterización climática 25
3.10. Disponibilidad del recurso solar 26
3.11. Potencial eólico 26
3.12. Disponibilidad del recurso hídrico 27

3.13. Potencial de biomasa 28
3.14. Selección de posibles soluciones 28
4. Dimensionamiento del sistema de generación fotovoltaica 30
4.1. Tipo de conexión 30
4.2. Método utilizado 31
4.3. Selección y cálculo de paneles 32
4.4. Cálculo total del sistema 32
4.5. Selección del inversor 33
4.6. Selección del sistema de almacenamiento 34
4.7. Selección de conductores y protecciones 34
4.8. Ubicación de la solución 34
4.9. Esquema de configuración de la solución 36
4.10. Evaluación de una red de distribución para las viviendas 37
5. Análisis financiero 37
5.1. Estimación de costos 38
5.1.1. CAPEX 38
5.1.2. OPEX 39
5.1.3. Costo total del proyecto 39
5.1.4. Análisis costo-beneficio 39
5.1.5. Retorno de la inversión 40
6. Conclusiones 40
7. Recomendaciones 42
Referencias Bibliográficas 44

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Consumo promedio mensual de energía eléctrica de la Asociación Campesina Alto Jordán 22
Tabla 2. Componentes del costo unitario del $/kWh. 25
Tabla 3. Comparación económica de las posibles soluciones para 1 kW 30
Tabla 4. Datos técnicos del panel seleccionado. 31
Tabla 5. Parámetros principales para el dimensionamiento 32
Tabla 6. Estimaciones Económicas 38

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Área propuesta para la instalación del sistema fotovoltaico. 36

Lista de Anexos

Los anexos están disponibles en el Repositorio Institucional

Anexo A. Ubicación geográfica de la Asociación Campesina Alto Jordán

Anexo B. Visita técnica y caracterización social de la Asociación Campesina

Anexo C. Inspección física de la red eléctrica de la Asociación Campesina Alto Jordán

Anexo D. Caracterización climática y disponibilidad del recurso solar

Anexo E. Disponibilidad de potencial eólico

Anexo F. Disponibilidad del recurso hídrico

Anexo G. Disponibilidad del potencial de la biomasa

Anexo H. Selección de posibles soluciones energéticas

Anexo I. Análisis económico de posibles soluciones

Anexo J. Dimensionamiento del sistema de generación fotovoltaica

Anexo K. Análisis costo-beneficio del sistema de generación fotovoltaica

Anexo L. Diagrama unifilar y disposición del diseño

Anexo M. Ecuaciones del análisis económico y su interpretación

Anexo N. Fichas técnicas de los equipos seleccionados

Resumen

Título: Diseño de una solución de generación con fuentes no convencionales de energía renovable en Asociación Campesina de Alto Jordán, Vélez, Santander.*

Autor: Johan Sneider Santamaria Herreño.**

Palabras Clave: Caracterización, Prefactibilidad, FNCER.

Descripción:

El acceso confiable a la energía eléctrica representó uno de los principales desafíos para las comunidades rurales colombianas. En particular, la Asociación Campesina de Alto Jordán, ubicada en Vélez, Santander, presenta interrupciones frecuentes del suministro, ocasionadas principalmente por eventos climáticos y fallas en la red de distribución. Ante esta situación, el trabajo de grado diseñó una solución de generación mediante fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), adaptada a las condiciones técnicas, geográficas, climáticas y socioeconómicas de la comunidad. Para tal propósito, se caracterizaron el área de estudio y la infraestructura eléctrica existente; posteriormente, se evaluó el potencial de los recursos solar, eólico, hídrico y de biomasa mediante información geográfica, observaciones de campo y bases de datos especializadas. Asimismo, las alternativas energéticas se compararon a partir de criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales. Como resultado, la energía solar fotovoltaica se seleccionó como la opción más viable, por lo cual se formuló un sistema híbrido conectado a la red, compuesto por 16 módulos de 720 Wp (11,52 kWp), un inversor de 10 kW y almacenamiento mediante baterías de litio de 10,24 kWh, acoplado al tablero existente de la cancha de microfútbol con entrega de excedentes. Finalmente, el diseño incluyó la estimación de la demanda, el dimensionamiento de equipos, protecciones y conductores, y una evaluación económica preliminar orientada a futuras etapas de implementación.

---

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Rolando Andrés Saravia Rincón. Codirector: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga.

Abstract

Title: Design of a generation solution using non-conventional renewable energy sources for Alto Jordán Peasant Association, Vélez, Santander.*

Author: Johan Sneider Santamaria Herreño.**

Keywords: Characterization, Pre-feasibility, NCRE.

Description:

Reliable access to electricity represented one of the main challenges faced by rural communities in Colombia. In particular, the Alto Jordán Farmers' Association, located in Vélez, Santander, experienced frequent power supply interruptions, mainly caused by weather-related events and distribution network faults. In response to this situation, this study designed a power-generation solution based on non-conventional renewable energy sources (NCRE), adapted to the community's technical, geographical, climatic, and socioeconomic conditions. For this purpose, the study area and the existing electrical infrastructure were characterized; subsequently, the potential of solar, wind, hydropower, and biomass resources was assessed using geographical information, field observations, and specialized databases. Furthermore, the energy alternatives were compared according to technical, economic, environmental, and social criteria. As a result, solar photovoltaic energy was selected as the most viable option; therefore, a grid-connected hybrid system consisting of 16 photovoltaic modules rated at 720 Wp (11.52 kWp), a 10 kW inverter, and 10.24 kWh lithium battery storage was proposed, coupled to the existing micro-soccer court electrical panel with potential surplus injection into the grid. Finally, the design included demand estimation, equipment, conductor, and protection sizing, definition of the connection scheme, and a preliminary economic assessment to guide future implementation.

---

* Undergraduate Thesis

** Faculty of Physicomechanical Sciences. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Rolando Andrés Saravia Rincón. Co-director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga.

Glosario

Comunidad energética: grupo de personas o entidades que gestionan de forma colectiva la producción, distribución y consumo de energía, generalmente a partir de fuentes renovables, para satisfacer sus necesidades energéticas de manera sostenible.

Energías limpias: fuentes de energía que no emiten contaminantes o gases de efecto invernadero durante su producción, como la energía solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica.

Fuentes no convencionales de energía (FNCE): fuentes de energía que no están basadas en los recursos tradicionales como el petróleo, gas o carbón. Incluyen energías renovables como solar, eólica, biomasa, geotérmica y otras fuentes emergentes.

Fuentes no convencionales de energía renovables (FNCER): fuentes de energía disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles y se renuevan de forma continua, pero que en el país no son empleadas o son utilizadas de manera marginal, como la energía solar, eólica, de biomasa, geotérmica y los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos.

Transición energética: proceso de cambio hacia un modelo energético más sostenible, que reemplaza las fuentes de energía convencionales (como los combustibles fósiles) por fuentes renovables y limpias, reduciendo la dependencia de recursos no renovables y mejorando la eficiencia energética.

Zona no interconectada (ZNI): área geográfica que no está conectada a la red eléctrica principal del país o región, lo que significa que no tiene acceso directo a la infraestructura del sistema eléctrico nacional. Estas zonas dependen de fuentes de energía locales, como generadores diésel o sistemas fotovoltaicos, para abastecerse de electricidad.

Introducción

La transición energética representa uno de los principales desafíos del sector eléctrico colombiano, debido a la necesidad de diversificar la matriz energética mediante fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER). En este escenario, la Ley 1715 de 2014 estableció las bases para incorporar dichas tecnologías al Sistema Energético Nacional, mientras que la Ley 2099 de 2021 amplió los mecanismos destinados a fomentar la eficiencia energética, la autogeneración y la generación distribuida. En concordancia con este panorama, Orozco-Álvarez et al. (2025) señalaron que las comunidades energéticas favorecieron la democratización del servicio al convertir a los territorios rurales en participantes activos de su producción.

No obstante, los avances normativos no resolvieron por completo las dificultades de continuidad y calidad del suministro en las zonas apartadas. En particular, la Asociación Campesina de Alto Jordán, ubicada en Vélez, Santander, presentó interrupciones frecuentes durante las temporadas de lluvia, las cuales afectaron las labores domésticas, agrícolas y productivas. Frente a circunstancias semejantes, Hernández y Gentile (2025) destacaron que la incorporación de soluciones renovables en organizaciones rurales fortaleció la producción local cuando estuvo acompañada por la participación comunitaria. Por consiguiente, la situación identificada evidenció la necesidad de buscar una alternativa adaptada a las condiciones reales del territorio.

Ante esta problemática, el trabajo de grado se orientó al diseño de una solución de generación con FNCER para la Asociación Campesina de Alto Jordán. Para tal efecto, se caracterizaron las condiciones geográficas, climáticas, sociales y eléctricas de la zona; posteriormente, se estimó el potencial de los recursos disponibles, se contrastaron las alternativas viables y se formuló el diseño preliminar del sistema seleccionado. Desde esta perspectiva,

Valderrama et al. (2025) sostuvieron que los proyectos comunitarios de energía limpia requirieron articular el componente técnico con las particularidades económicas, ambientales y organizativas de cada población. Por ello, la propuesta no se limitó a elegir una tecnología, sino que procuró responder a las necesidades reconocidas durante el diagnóstico.

Finalmente, el documento se organizó en capítulos que condujeron desde la comprensión del problema hasta la valoración de la solución propuesta. Inicialmente, se expusieron los objetivos, el alcance y los fundamentos conceptuales; luego, se desarrollaron la caracterización territorial, el diagnóstico de la infraestructura eléctrica y el estudio de los recursos renovables. A continuación, se presentaron la selección de la alternativa, el dimensionamiento de sus componentes y la evaluación económica. Como cierre, se formularon las conclusiones derivadas de los resultados, junto con las recomendaciones destinadas a orientar posteriores etapas de validación, financiación e implementación.

1. Objetivos y Alcances

En este capítulo se presenta el alcance del trabajo de grado, el objetivo general y los objetivos específicos que orientan el desarrollo de la propuesta de investigación para el diseño de una solución de generación con fuentes no convencionales de energía renovable.

1.1. Alcance del proyecto de grado

El presente trabajo comprende la caracterización geográfica, climática, social y energética de la Asociación Campesina de Alto Jordán, así como la evaluación del potencial de las fuentes no convencionales de energía renovable disponibles en la zona. Con base en este análisis, se seleccionará la alternativa de generación más viable y se desarrollará el diseño preliminar del sistema, incluyendo el dimensionamiento de los equipos principales y la evaluación técnica y económica de la propuesta. El proyecto no contempla la construcción ni la implementación del sistema, sino el desarrollo de una propuesta de prefactibilidad que sirva como base para futuros proyectos de electrificación rural.

1.2. Objetivo General

Diseñar una solución de generación con fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) para la Asociación Campesina de Alto Jordán, Vélez, Santander.

1.3. Objetivos Específicos

Caracterizar las condiciones geográficas, climáticas y sociales de la vereda Alto Jordán, mediante el análisis de datos secundarios y observación en campo, con el fin de identificar el potencial de aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) como solar, eólica, hídrica y biomasa.

Evaluar y comparar las alternativas energéticas identificadas, utilizando criterios técnicos, económicos y ambientales, para seleccionar la fuente de generación más adecuada y sostenible para la comunidad.

Diseñar un sistema energético basado en la fuente seleccionada, que incluya la estimación de carga, dimensionamiento de equipos, selección de componentes y elaboración de un presupuesto preliminar para su implementación.

2. Marco referencial

2.1. Marco normativo de las comunidades energéticas

El desarrollo de las comunidades energéticas en Colombia estuvo vinculado con las políticas orientadas a transformar la matriz eléctrica mediante fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER). En primer lugar, la Ley 1715 de 2014 estableció disposiciones para promover su integración al Sistema Energético Nacional, así como para impulsar la autogeneración, la generación distribuida y la eficiencia energética. A su vez, la Ley 2099 de 2021 amplió este marco al incorporar nuevos mecanismos de promoción e incentivos para el aprovechamiento de recursos renovables. De este modo, ambas normas abrieron un escenario favorable para formular iniciativas energéticas sostenibles en distintos territorios del país.

Posteriormente, el Decreto 2236 de 2023 reglamentó la conformación, participación y funcionamiento de las comunidades energéticas, por lo cual reconoció a las organizaciones locales como actores capaces de generar, comercializar o utilizar eficientemente la energía. En consonancia con este avance, Galindo et al. (2025) encontraron que Colombia dispuso de políticas públicas y condiciones jurídicas favorables para consolidar este tipo de iniciativas, aunque persistieron desafíos políticos, socioeconómicos, tecnológicos, ambientales y culturales. Por consiguiente, el respaldo normativo representó un punto de partida indispensable, pero su

aplicación requirió comprender las particularidades de cada comunidad para evitar que la regulación permaneciera alejada de las realidades territoriales.

2.2. Autogeneración y generación distribuida

La incorporación de sistemas de generación cercanos a los centros de consumo estuvo regulada principalmente por la Resolución CREG 174 de 2021, aplicable a la autogeneración a pequeña escala y a la generación distribuida dentro del Sistema Interconectado Nacional. Esta disposición definió las condiciones de conexión, los requisitos técnicos, la puesta en operación y el tratamiento comercial de la energía entregada a la red. En este sentido, Manrique et al. (2025) explicaron que la evolución normativa colombiana facilitó la integración de soluciones renovables al establecer reglas para su operación, respaldo eléctrico y comercialización de excedentes.

Para la Asociación Campesina Alto Jordán, estas disposiciones adquirieron especial relevancia, puesto que la alternativa seleccionada correspondió a un sistema fotovoltaico conectado a la infraestructura eléctrica existente. Por consiguiente, el diseño consideró el procedimiento de conexión ante el operador de red, la capacidad disponible en el punto de enlace y la instalación de un medidor bidireccional. Asimismo, la regulación permitió contemplar el aprovechamiento de la energía para el autoconsumo, mientras que los excedentes pudieron entregarse al sistema bajo las condiciones comerciales aplicables. De esta manera, el proyecto articuló su propuesta técnica con las exigencias regulatorias previstas para este tipo de instalación.

2.3. Fuentes no convencionales de energía renovable

Las fuentes no convencionales de energía renovable comprendieron recursos capaces de producir electricidad con una menor dependencia de los combustibles fósiles. Dentro de este

grupo, la Ley 1715 de 2014 reconoció la energía solar, la eólica, la biomasa y los pequeños aprovechamientos hidroenergéticos, entre otras posibilidades. En relación con su contribución ambiental, Piedrahita (2024) explicó que la generación solar fotovoltaica constituyó una estrategia relevante para descarbonizar el sector eléctrico colombiano, debido a que el marco normativo favoreció su incorporación como respuesta frente al cambio climático. De esta forma, las FNCER adquirieron un papel estratégico dentro de la transformación energética nacional.

En el caso de Alto Jordán, se evaluaron los recursos renovables presentes en la zona con el propósito de reconocer la alternativa que ofreciera mejores condiciones técnicas y económicas. Para ello, se examinaron la disponibilidad de cada recurso, las características geográficas del territorio y los requerimientos energéticos de la comunidad. Como resultado de este análisis, la energía solar fotovoltaica se seleccionó como la opción principal para formular la solución de generación. Por consiguiente, su elección no respondió únicamente a una tendencia tecnológica, sino a su capacidad para adaptarse a la infraestructura existente y aprovechar el potencial solar identificado en el área de estudio.

2.4. Sistemas solares fotovoltaicos conectados a red

Un sistema fotovoltaico conectado a red está compuesto principalmente por módulos solares, equipos de conversión de energía, protecciones eléctricas, conductores y sistemas de medición. La energía producida puede ser utilizada directamente por los usuarios y, cuando la generación supera el consumo instantáneo, los excedentes pueden ser entregados a la red bajo las condiciones establecidas por la regulación.

Para el diseño de Alto Jordán se considera un sistema fotovoltaico híbrido con almacenamiento mediante baterías, conectado al sistema eléctrico existente. El

dimensionamiento se realiza considerando la demanda energética de la comunidad, el recurso solar disponible y las características técnicas de los equipos seleccionados.

2.5. Reglamento técnico y requisitos de conexión

El diseño de la instalación eléctrica se sustentó en los lineamientos del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), expedido por el Ministerio de Minas y Energía. Este instrumento orientó la selección de conductores, protecciones, equipos y sistemas de puesta a tierra, con el propósito de reducir los riesgos derivados de la electricidad. En relación con su aplicación, Briceño y Duarte (2025) evidenciaron que la revisión de una instalación bajo criterios del RETIE permitió reconocer irregularidades, valorar su estado y formular mejoras dirigidas a proteger a las personas, los bienes y el entorno. Por tanto, su cumplimiento representó una condición esencial para garantizar la seguridad del sistema propuesto.

Asimismo, la conexión del sistema fotovoltaico requirió atender las condiciones técnicas y documentales definidas por el operador de red. En el caso de Alto Jordán, la infraestructura eléctrica estuvo a cargo de ESSA, razón por la cual el diseño consideró la capacidad disponible, el nivel de tensión, las protecciones requeridas y el procedimiento previsto para solicitar la conexión. De igual manera, se contemplaron los documentos necesarios para demostrar la conformidad de los componentes y respaldar la posterior legalización del proyecto. En consecuencia, la propuesta no se limitó al dimensionamiento de los equipos, sino que incorporó las exigencias que habrían permitido una integración segura a la red existente.

2.6. Medición y entrega de excedentes

La incorporación de un sistema de generación conectado a la red requiere un sistema de medición que permita registrar tanto la energía consumida como la energía entregada a la red.

Para este propósito se contempla la utilización de un medidor bidireccional, de acuerdo con las condiciones técnicas establecidas para la conexión.

En el caso de la Asociación Campesina Alto Jordán, el sistema permitirá priorizar el aprovechamiento de la energía generada para atender la demanda de la comunidad y registrar los excedentes que eventualmente sean inyectados a la red, de acuerdo con la regulación aplicable y los procedimientos establecidos por ESSA.

2.7. Criterios técnicos para el diseño

El dimensionamiento de la solución energética considera como variables principales la demanda eléctrica de la comunidad, el recurso solar disponible, las pérdidas asociadas al sistema, la capacidad de los módulos fotovoltaicos, el inversor, el almacenamiento mediante baterías y las características de la red existente.

A partir de estos parámetros se determina la capacidad de generación requerida y se seleccionan los equipos principales, conductores y dispositivos de protección necesarios para garantizar una operación segura y técnicamente viable.

3. Caracterización de la zona de estudio

La caracterización energética de la Asociación Campesina Alto Jordán tiene como propósito identificar las condiciones actuales del suministro eléctrico, las necesidades energéticas de las familias y las oportunidades de implementación de fuentes no convencionales de energía renovable. Para ello, se tendrán en cuenta el consumo de energía eléctrica de los hogares, la infraestructura de distribución existente, la continuidad del servicio, los equipos eléctricos utilizados y las principales necesidades que no se encuentran satisfechas. Asimismo, se identificarán los recursos energéticos disponibles en la zona y las condiciones geográficas y climáticas que pueden influir en el diseño de la solución. La información se recopilará mediante

la revisión de los datos de consumo disponibles, la observación de la infraestructura eléctrica y el diálogo con los integrantes de la comunidad, con el fin de establecer un diagnóstico que sirva como base para seleccionar y dimensionar una alternativa de generación adecuada a las condiciones del territorio.

3.1. Ubicación

La Asociación Campesina Alto Jordán se encuentra ubicada en el municipio de Vélez, departamento de Santander, Colombia, en las coordenadas 6.204478° N y -73.748251° O. El área de estudio corresponde a una zona rural caracterizada por un relieve montañoso y condiciones propias de la región andina.

La ubicación geográfica constituye un elemento fundamental para la caracterización energética, debido a que permite establecer las condiciones de radiación solar, comportamiento climático, disponibilidad de recursos hídricos y características del terreno. La ubicación de la Asociación Campesina Alto Jordán se presenta en el *Anexo A. Ubicación geográfica*.

3.2. Organización de la comunidad

La Asociación Campesina Alto Jordán está conformada por familias que se encuentran vinculadas a las actividades productivas y sociales desarrolladas en el territorio. La organización comunitaria constituye un aspecto importante para el desarrollo de una posible solución energética colectiva, debido a que permite identificar los usuarios que podrían beneficiarse de la generación y establecer las condiciones para una gestión conjunta del sistema.

Para el desarrollo del proyecto se consideraron las características de los usuarios y las condiciones de consumo eléctrico de las viviendas pertenecientes a la asociación. Esta

información sirve posteriormente como base para determinar la demanda energética y dimensionar el sistema de generación propuesto.

3.3. Sector social

Desde el punto de vista social, la comunidad corresponde a un sector rural en el que el acceso continuo al servicio de energía eléctrica representa un aspecto importante para las actividades domésticas y productivas. Entre las necesidades identificadas se encuentran el uso de iluminación, refrigeración, equipos de comunicación y otros elementos asociados a las actividades cotidianas de las familias.

Las condiciones de ruralidad y la ubicación geográfica de la comunidad hacen necesario considerar soluciones energéticas que puedan adaptarse a las características del territorio y contribuir a mejorar la disponibilidad de la energía eléctrica.

3.4. Sector económico

La economía de la Asociación Campesina Alto Jordán está relacionada principalmente con actividades domesticas agrícolas y pecuarias, desarrolladas a pequeña escala por las familias de la comunidad. Estas actividades representan una fuente de sustento para los habitantes y requieren el uso de energía eléctrica para algunas labores domésticas y productivas.

La caracterización económica permite identificar la capacidad y las necesidades energéticas de la comunidad, aspectos que posteriormente serán considerados dentro de la evaluación económica de las alternativas de generación y en la estimación de los costos asociados a la implementación del sistema energético.

Dentro de la información recopilada mediante las encuestas se incluyeron datos relacionados con el consumo de energía eléctrica y los costos mensuales asociados al servicio.

Estos valores serán utilizados posteriormente para establecer el comportamiento de la demanda y realizar la evaluación económica de la alternativa seleccionada.

La información correspondiente a las condiciones económicas y productivas de la comunidad se presenta en el *Anexo B*.

3.5. Análisis de la demanda

Para determinar la demanda energética de la Asociación Campesina de Alto Jordán (Tabla 1), se realizó una revisión de las facturas de la comunidad en este caso doce viviendas analizadas de consumo para el dimensionamiento del sistema de generación propuesto.

Los consumos presentan diferencias entre las viviendas, asociadas principalmente a la cantidad de personas por vivienda y al uso de equipos eléctricos. El Anexo B describe lo que corresponde al consumo de energía eléctrica. El consumo obtenido es de 1076 kWh/mes, equivalente a un consumo diario de 35,87 kWh/día como referencias para el dimensionamiento del sistema.

Tabla 1

Consumo promedio mensual de energía eléctrica de la Asociación Campesina Alto Jordán

Casa	Usuario	Consumo promedio (kWh/mes)
1	Nativa Quiroga	162
2	Lydia Hernández	50
3	Luz Marian Quiroga	62
4	Rosa Morales	48
5	Ana Edith	109
6	Emilce	151
7	Amanda Suárez	77
8	Nancy Gonzales	146
9	Mercedes Quiroga	73
10	Piedad Hernández	58

Casa	Usuario	Consumo promedio (kWh/mes)
11	Isabel Serrano	48
12	Olga Moncada	92
Total	**—**	**1076**

3.6. Caracterización de la infraestructura eléctrica

Como parte de la caracterización de la zona de estudio se realizó una inspección física de la infraestructura eléctrica existente. Esta actividad permitió identificar las condiciones de la red de distribución, los elementos asociados al suministro y el transformador encargado de atender la demanda de la comunidad.

De acuerdo con la información recopilada durante la inspección y los datos suministrados por el operador de red ESSA – Grupo EPM, la comunidad obtiene el suministro de energía mediante un transformador de distribución trifásico de 30 kVA, instalado sobre poste y conectado a una red de media tensión de 13,2 kV. El nivel de tensión secundaria corresponde a 220 V.

La infraestructura observada incluye postes, conductores, acometidas, medidores y demás elementos asociados a la distribución de energía eléctrica. Durante la visita no se identificaron daños físicos evidentes en los principales elementos inspeccionados.

Sin embargo, los habitantes manifestaron la ocurrencia de interrupciones del servicio, especialmente durante periodos de lluvia, asociadas principalmente a eventos atmosféricos y fallas en la red de distribución.

El registro fotográfico y la información técnica obtenida durante la inspección se presentan en el *Anexo C.*

3.7. Fronteras comerciales

De acuerdo con la información registrada en las facturas del servicio, pertenece a la Subestación Landázuri (78) y se encuentra asociado al circuito 78502 CTO 2 LAN, con identificación 0182114.

La frontera comercial del proyecto se considera en el punto de conexión entre la instalación de la comunidad y la red del operador de red. Para la integración de la generación fotovoltaica se contempla la utilización de un medidor bidireccional, que permita registrar tanto la energía consumida desde la red como la energía que eventualmente sea entregada a esta.

La simulación realizada mediante el procedimiento de disponibilidad de ESSA indica que, para una generación propuesta de 12 kW, el punto de conexión presenta una capacidad de autogeneración de 15 kW y una disponibilidad reportada del 40 % para un sistema fotovoltaico con almacenamiento. De acuerdo con estos resultados, la potencia considerada se encuentra dentro del rango indicado por el procedimiento de conexión analizado. En el *Anexo J* esta más detallado este estudio.

3.8. Tarifas de energía

Para establecer el costo de la energía utilizado en el análisis económico se revisaron las facturas suministradas por los usuarios de la Asociación Campesina Alto Jordán. A partir de estas se obtuvo un valor promedio de las diferentes componentes que conforman el costo unitario de la energía. Su costo unitario promedio es de $878,86/kWh, cuyos valores se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2

Componentes del costo unitario del $/kWh.

Componente	Promedio ($/kWh)
Generación (G)	272,28
Transmisión (T)	55,38
Distribución (D)	316,31
Comercialización (C)	125,83
Pérdidas (PR)	61,68
Restricciones (R)	47,38
Costo unitario promedio	878,86

3.9. Caracterización climática

Las condiciones climáticas del área de estudio fueron analizadas mediante información histórica de temperatura y precipitación. El análisis permite establecer las características ambientales que pueden influir en el comportamiento de los recursos renovables y en las condiciones de operación de los equipos de generación.

Los datos analizados muestran que la temperatura media anual de la zona se encuentra alrededor de 22 °C. La temperatura máxima media diaria presenta valores aproximados entre 26 °C y 28 °C, mientras que la temperatura mínima media diaria se encuentra entre 19 °C y 20 °C.

En cuanto a la precipitación, se presenta una variación durante el año, con periodos de mayor acumulación de lluvia. Estas condiciones son relevantes para el proyecto debido a su influencia sobre la disponibilidad del recurso hídrico y sobre las condiciones ambientales de operación del sistema fotovoltaico.

La información, tablas y resultados correspondientes a la caracterización climática se presentan en el *Anexo D.*

3.10. Disponibilidad del recurso solar

El recurso solar constituye una de las principales fuentes analizadas para determinar su posible aprovechamiento energético en la Asociación Campesina Alto Jordán.

Para evaluar su disponibilidad se utilizaron las plataformas NASA POWER y PVGIS, empleando información histórica de diferentes periodos. NASA POWER permitió analizar el comportamiento de las Horas Sol Pico (HSP) durante el periodo 2021–2025, mientras que PVGIS permitió complementar la información con datos correspondientes al periodo 2019–2023.

La comparación de los registros de NASA POWER y PVGIS permitió obtener un promedio mensual de las Horas Sol Pico (HSP) para cada mes del año. Estos valores representan el comportamiento medio del recurso solar y se utilizan como referencia para describir su disponibilidad mensual en el área de estudio.

De acuerdo con la comparación de ambas fuentes, el promedio anual de referencia es cercano a 5,02 kWh/m²·día. La Tabla D3 del Anexo D presenta los promedios mensuales calculados a partir de los datos de PVGIS y NASA POWER; el detalle de las series históricas y su procedimiento de comparación se encuentra en el Anexo D.

3.11. Potencial eólico

El potencial eólico de la zona fue evaluado mediante información obtenida de bases de datos especializadas, considerando variables como velocidad, dirección y densidad de potencia del viento. Los resultados muestran que la velocidad del viento presenta valores relativamente bajos durante el periodo analizado. Para el año 2025 se obtuvieron velocidades máximas mensuales comprendidas aproximadamente entre 2,22 m/s y 3,08 m/s, con un promedio anual cercano a 2,77 m/s.

Estos valores representan una disponibilidad limitada del recurso eólico para aplicaciones de generación eléctrica. Por esta razón, aunque la energía eólica se mantiene dentro de las alternativas consideradas inicialmente, sus condiciones de aprovechamiento resultan menos favorables frente al recurso solar.

Los resultados y análisis correspondientes se presentan en el *Anexo E*.

3.12. Disponibilidad del recurso hídrico

Durante la visita realizada a la Asociación Campesina Alto Jordán se consultó a los habitantes sobre la presencia de fuentes hídricas que pudieran ser aprovechadas para la generación de energía eléctrica. De acuerdo con la información proporcionada por la comunidad, se identificaron como principales referencias el río Negro y la cascada de Las Palmas.

Sin embargo, se estableció que ambos lugares se encuentran aproximadamente a una hora de camino desde la comunidad, lo que representa una limitación para su aprovechamiento energético. La implementación de un sistema de generación hidroeléctrica en estos puntos requeriría, además de la infraestructura propia de generación, la construcción de una nueva red de distribución eléctrica hasta la Asociación Campesina Alto Jordán.

Esta condición implicaría costos adicionales asociados a la construcción, instalación y mantenimiento de la infraestructura eléctrica necesaria para transportar la energía desde dichos puntos hasta la comunidad. Por esta razón, aunque existe disponibilidad de recurso hídrico en el entorno, su aprovechamiento presenta una menor viabilidad técnica y económica frente a alternativas de generación que puedan instalarse directamente en el área de la comunidad.

La información relacionada con la evaluación del recurso hídrico se presenta en el **Anexo F.**

3.13. Potencial de biomasa

La biomasa fue considerada como una alternativa de generación debido a las actividades agrícolas y pecuarias desarrolladas por la comunidad, las cuales generan residuos orgánicos potencialmente aprovechables para la producción de energía.

A partir de la información disponible se realizó una estimación de la cantidad de residuos generados y de su contenido energético. El análisis permitió determinar un potencial energético teórico asociado a los residuos orgánicos disponibles.

Sin embargo, no todos los residuos generados pueden ser destinados a la producción energética, debido a que una parte de estos materiales es utilizada directamente en las actividades agrícolas, principalmente como abono, o permanece en los terrenos de cultivo.

Por esta razón, aunque la biomasa presenta un potencial energético teórico, su aprovechamiento efectivo depende de la cantidad de residuos que puedan ser recolectados de manera continua y de la implementación de la infraestructura necesaria para su transformación energética. La estimación del potencial de generación mediante biomasa se presenta en el Anexo G.

3.14. Selección de posibles soluciones

A partir de la caracterización realizada en la Asociación Campesina Alto Jordán, se realizó una preselección de las alternativas de generación mediante Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) que presentan mejores condiciones para continuar con el desarrollo del proyecto.

Para esta preselección se tuvieron en cuenta principalmente dos criterios: la viabilidad técnica, relacionada con las condiciones identificadas durante la visita a la comunidad y la

infraestructura eléctrica existente, y el potencial de aprovechamiento del recurso, determinado a partir de la disponibilidad de cada fuente energética en el área de estudio.

Al analizar las alternativas solar, eólica, hídrica y biomasa, se identificó que la energía solar fotovoltaica presenta condiciones favorables debido a la disponibilidad del recurso solar en la zona y a la posibilidad de implementar el sistema utilizando la infraestructura eléctrica existente. Por otra parte, la biomasa presenta un potencial asociado a los residuos generados por las actividades agrícolas y pecuarias desarrolladas por la comunidad. La selección está detallada en el *Anexo H.*

La alternativa eólica presenta condiciones menos favorables para su aprovechamiento debido a las características del recurso identificadas en la zona. En cuanto a la alternativa hídrica, durante la visita se identificaron fuentes como el río Negro y la cascada de Las Palmas; sin embargo, su ubicación, aproximadamente a una hora de camino de la comunidad, implicaría la construcción de infraestructura adicional para transportar la energía generada, aumentando los costos y las dificultades de implementación.

Con base en este análisis, se seleccionaron como posibles soluciones energéticas la generación solar fotovoltaica y la generación mediante biomasa. Ambas alternativas serán analizadas posteriormente considerando aspectos técnicos y económicos, con el propósito de establecer cuál presenta mejores condiciones para atender las necesidades energéticas de la Asociación Campesina Alto Jordán.

La evaluación utilizada para la selección de estas alternativas se presenta en el Anexo H. Adicionalmente, en el Anexo I, se presenta el análisis de costos de las posibles soluciones. En la Tabla 3 se realiza una comparación de la inversión requerida para una solución de 1 kW,

considerando el costo de sus principales componentes de las dos alternativas de generación viables: solar y biomasa.

Tabla 3

Comparación económica de las posibles soluciones para 1 kW

Alternativas	Componentes principales	Inversión aproximada (COP)
Solar	Panel fotovoltaico, inversor y batería	$2,150,000
Biomasa	Biodigestor, almacenamiento de biogás y generador	$4,000,000

4. Dimensionamiento del sistema de generación fotovoltaica

El dimensionamiento se realizó a partir del consumo promedio de la comunidad y de las condiciones del recurso solar disponible en Alto Jordán. En este trabajo de grado, se realizó el dimensionamiento del sistema (AGPE), autogenerador a pequeña escala con entrega de excedentes a la red conectado al sistema de distribución a pequeña escala, destinado principalmente al autoconsumo de la cancha. Se consideraron las pérdidas asociadas al sistema y un factor adicional de sobredimensionamiento de 15%, con el propósito de compensar diversas variaciones en la operación, los cálculos y especificaciones detalladas se encuentran en el Anexo J.

4.1. Tipo de conexión

La solución propuesta para la Asociación Campesina Alto Jordán corresponde a un autogenerador a pequeña escala (AGPE), con entrega de excedentes a la red. El proyecto se encuentra dentro del rango de AGPE $\leq$ 100 kW establecido para el procedimiento de conexión a la red simplificado.

El sistema propuesto corresponde a un SFV híbrido, on-grid con almacenamiento mediante baterías. Se opta por esta solución por la red ya existente y, adicionalmente el almacenamiento para mejorar la calidad y continuidad en el suministro de energía eléctrica. La instalación se diseña en baja tensión.

Para el registro de los flujos de energía eléctrica se contempla la instalación de un medidor bidireccional, registra la energía eléctrica tanto consumida por la cancha como entregada por el sistema de generación fotovoltaico. ESSA contempla este tipo de medición para los AGPE que entregan excedentes.

4.2. Método utilizado

Está basado en el consumo promedio de las facturas, donde se realiza una estimación que tiene en cuenta varios aspectos: pérdidas de potencia por suciedad y sombreado de los paneles fotovoltaicos y pérdidas de potencia en los componentes del sistema FV, además de considerar un consumo ajustado de la demanda.

Para la instalación se selecciona una estructura fija orientada hacia el sur geográfico, con un ángulo de inclinación de 10°. Estos parámetros fueron establecidos mediante el análisis realizado con PVGIS para estas condiciones, además de la posición geográfica. La Tabla 4 presenta las especificaciones técnicas del panel seleccionado.

Tabla 4

Datos técnicos del panel seleccionado.

Características	Valor
Potencia máxima, Pmax(Wp)	720 W
Tensión de circuito abierto, Voc (V)	49,04 V
Corriente de cortocircuito, Isc (A)	18,67 A
Tensión en el punto de máxima potencia, Vmp(V)	40,89 V

Características	Valor
Corriente en el punto de máxima potencia, Imp (A)	17,61 A
Eficiencia (%)	23,2 %

4.3. Selección y cálculo de paneles

La división en dos strings permitió organizar el campo fotovoltaico sin concentrar los 16 módulos en una sola cadena. Cada string presenta una corriente aproximada de 17,61 A y una tensión operativa cercana a 327,12 V.

Sin embargo, antes de aprobar el diseño, es necesario verificar la compatibilidad eléctrica entre los módulos fotovoltaicos y el inversor seleccionado. Para cada string de ocho módulos se calculó una tensión de circuito abierto de 392,32 V y una tensión de operación de 327,12 V, mientras que la ficha técnica del inversor establece un rango MPPT de 150 a 430 V y una tensión máxima fotovoltaica de 450 V. Los valores calculados se encuentran dentro de estos límites en condiciones estándar de ensayo (STC).

4.4. Cálculo total del sistema

En la tabla 5, se presentan los datos para la selección de principales materiales para el diseño de la solución su análisis detallado se encuentra en el Anexo J.

Tabla 5

Parámetros principales para el dimensionamiento

Parámetro	Valor
Consumo promedio mensual	1.076 kWh/mes
Consumo diario	35,87 kWh/día
Consumo de energía ajustado	46,81 kWh/día
Potencia instalada en DC (calculada)	10.76 kWp
Potencia instalada en DC (paneles)	11,52 kWp
Potencia instalada en AC	10 kW

Parámetro	Valor
HSP de diseño	5 kWh/m²·día

4.5. Selección del inversor

Para realizar la conversión de la energía generada por los módulos y gestionar el almacenamiento se seleccionó el inversor híbrido MUST PRO de 10 kW.

Esta selección se realizó teniendo en cuenta la potencia nominal, la disponibilidad de seguidores MPPT para conectar las cadenas de paneles y su amplia gestión con los demás dispositivos del diseño, su ficha técnica se encuentra en el Anexo J.

En cuanto a la compatibilidad eléctrica, el diseño contempla 16 módulos fotovoltaicos Tiger Neo de 720 W, para una potencia instalada de 11,52 kWp, distribuidos en dos cadenas de ocho módulos.

De acuerdo con el dimensionamiento, cada string presenta una tensión de circuito abierto de 392,32 V y una tensión de máxima potencia de 327,12 V en condiciones STC. El inversor admite una tensión fotovoltaica máxima de 450 V y un rango MPPT de 150 a 430 V.

A una temperatura de celda de 10 °C, se estimó una tensión de circuito abierto de 407,03 V, inferior al límite del inversor. Sin embargo, se debe establecer la temperatura mínima de diseño del emplazamiento para verificar la tensión máxima de operación.

Asimismo, cada string presenta una corriente de máxima potencia de 17,61 A y una corriente de cortocircuito de 18,67 A. Por tanto, se debe confirmar que las entradas MPPT admitan estas corrientes y que el inversor permita una potencia fotovoltaica de 11,52 kWp. La configuración de dos strings de ocho módulos se considera preliminar hasta completar estas verificaciones.

4.6. Selección del sistema de almacenamiento

Debido a las interrupciones del suministro eléctrico por lluvias o fallas en general, se incorporó un sistema de almacenamiento mediante baterías de litio.

Se seleccionan dos baterías Dyness BX51100, cada una con capacidad nominal de 5,12 kWh. Siendo la capacidad instalada de las baterías de 10,24 kWh. El almacenamiento permite disponer de energía para las cargas de respaldo cuando la generación fotovoltaica es insuficiente o cuando se presente una interrupción del suministro de la red. Además, permite aprovechar parte de la generación solar durante las horas más productivas.

4.7. Selección de conductores y protecciones

Los conductores y dispositivos de protección del sistema fotovoltaico se seleccionaron cumpliendo los requisitos técnicos y de seguridad establecidos en el RETIE, las NTC aplicables y las normas internacionales correspondientes. Se incluyeron protecciones para corriente continua y alterna, con el fin de garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento del sistema. Las especificaciones se presentan en el Anexo J.

4.8. Ubicación de la solución

El arreglo fotovoltaico se instalará sobre la estructura de cubierta de la cancha de microfútbol ubicada en el predio de propiedad municipal, como se muestra en la Figura 1. El terreno cuenta con un área aproximada de 750 m² y un perímetro de 87 m. De acuerdo con la información consultada en el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio, no se identificaron restricciones que impidan la instalación del sistema en el lugar propuesto. El inversor y el banco de baterías se ubicarán en un cuarto de máquinas dentro de la iglesia, por

razones de seguridad y para limitar el acceso no autorizado a los equipos. La viabilidad de esta ubicación deberá confirmarse mediante un estudio específico del cuarto, que evalúe dimensiones, ventilación, temperatura, humedad, protección contra incendios, accesibilidad, distancias de seguridad, puesta a tierra y cumplimiento de los requisitos del fabricante y de la normativa aplicable. También deberá verificarse el recorrido de los conductores entre la cancha, el cuarto de máquinas y el punto de conexión.

A partir de la evaluación del espacio disponible, se verificó que el terreno permite ubicar los 16 módulos fotovoltaicos seleccionados y distribuirlos de manera organizada sobre el techo, conservando el espacio necesario para el acceso y las labores de mantenimiento. Para ello, se propone construir una estructura de soporte para montaje en techo, diseñada para proporcionar la inclinación de 10° establecida en el dimensionamiento del sistema y favorecer el aprovechamiento del recurso solar. La estructura deberá garantizar la estabilidad de los módulos y resistir las condiciones ambientales del lugar. Su diseño definitivo deberá considerar las características del terreno, los anclajes y las cargas de viento correspondientes.

Para reducir el riesgo de hurto, manipulación indebida y daños, se propone instalar señalización visible de riesgo eléctrico y disponer medidas de control de acceso compatibles con el uso comunitario de la cancha.

Figura 1

Área propuesta para la instalación del sistema fotovoltaico.



Estas características hicieron posible considerar una estructura fija para los módulos. No obstante, antes de una instalación definitiva se realizó una verificación visual de sombras y dimensiones posibles en la ubicación seleccionada, debido a que el arreglo final estará compuesto por varios módulos de gran formato.

4.9. Esquema de configuración de la solución

Con el propósito de representar la configuración eléctrica de la solución fotovoltaica propuesta para la Asociación Campesina de Alto Jordán, se representa mediante un diagrama unifilar, en el cual se identifican los módulos fotovoltaicos, el inversor híbrido, el banco de baterías y los dispositivos de protección. Este esquema permite visualizar la disposición de los componentes y las conexiones principales del sistema. El diagrama unifilar completo se presenta en el Anexo L.

4.10. Evaluación de una red de distribución para las viviendas

Como alternativa de configuración se evaluó la posibilidad de implementar una red de distribución desde el sistema de generación hasta las viviendas de la Asociación Campesina Alto Jordán. Esta opción requeriría definir el trazado, los conductores, las acometidas, las protecciones y la medición individual de los usuarios, además de verificar las condiciones técnicas y regulatorias aplicables.

Sin embargo, esta alternativa no se seleccionó para la solución propuesta, debido a que implica infraestructura adicional y mayores costos de instalación y operación. Por tanto, el diseño desarrollado en este trabajo se limita a la configuración fotovoltaica conectada a la red existente, con almacenamiento mediante baterías, y no contempla la construcción de una nueva red de distribución hacia cada vivienda.

5. Análisis financiero

El análisis financiero permite determinar la relación entre la inversión requerida para implantar el sistema y permitir establecer la viabilidad económica, se realizará con el propósito de evaluar el costo y el comportamiento de retorno de la inversión (ROI). A través de este análisis se determina la rentabilidad a largo plazo.

Para el correcto análisis es importante revisar las tarifas de energía eléctrica del operador de red, pues estas impactan directamente en el costo total de los usuarios, también se considera el descuento del subsidio por el estrato de la comunidad para tener claro el ahorro efectivo obtenido mediante la SFV.

Otro factor considerado corresponde al costo del mercado de energía eléctrica, relacionado con las condiciones de oferta y demanda, además de afectar el cobro de los

excedentes como también el límite de inyección de excedentes a la red. El detalle de estos cálculos se encuentra desarrollado en el Anexo K.

5.1. Estimación de costos

Las estimaciones económicas se construyen a partir de los componentes definidos durante el dimensionamiento y se resumen en la Tabla 6. Se incluyeron los equipos principales, protecciones, conductores, canalización, estructura, etc., detallados en el Anexo J.

Tabla 6

Estimaciones Económicas

Concepto	**Valor (COP)**
Materiales y equipos	$40.714.864
Transporte	$2.100.000
Instalación	$13.551.000
Certificación RETIE	$3.000.000
Legalización ante el operador de red	$2.000.000
Registro UPME	$1.000.000
Subtotal	**$62.365.864**
Gastos administrativos (12 %)	$7.483.904
Imprevistos (5 %)	$3.118.293
Utilidad (15 %)	$9.354.880
CAPEX estimado	**$82.322.941**
OPEX anual estimado	**$7.000.000**
Costo total del primer año	$89.322.941

5.1.1. CAPEX

El CAPEX corresponde a la inversión inicial estimada para disponer del sistema en condiciones de operación. Para el proyecto de Alto Jordán, este valor se calcula a partir de los materiales y equipos valorados, transporte, instalación, certificaciones, trámites y los porcentajes de administración, imprevistos y utilidad incluidos en la Tabla 6 y el Anexo K.

$$\text{CAPEX} = \$82.322.941\ \text{COP}$$

El valor presentado es una estimación de los costos valorados para la implementación. Se ajustaron las cantidades de conductores y canalizaciones para que coincidan con los materiales principales del Anexo J. La canalización de baterías y otros elementos que no cuentan con precio unitario confirmado no están incluidos en el total calculado; por ello, el CAPEX puede aumentar cuando se obtengan las cotizaciones y se verifiquen las cantidades en sitio.

5.1.2. OPEX

El OPEX corresponde a una estimación de los costos asociados con la operación y el mantenimiento del sistema durante su funcionamiento. Para el análisis económico se considera el siguiente costo anual:

$$\text{OPEX} = \$7.000.000\ \text{COP/año}$$

El valor de OPEX es referencial y puede variar durante la operación según las actividades de mantenimiento que se requieran y sus costos efectivos.

5.1.3. Costo total del proyecto

Considerando la inversión inicial y el costo de operación correspondiente al primer año:

$$Costo_{total} = CAPEX + OPEX$$
$$Costo_{total} = 82.322.941 + 7.000.000$$
$$Costo_{total} = \$89.322.941\ \text{COP}$$

5.1.4. Análisis costo-beneficio

Con los datos disponibles en el Anexo K no es posible establecer todavía un beneficio bruto anual confiable. La tabla K3 presenta inconsistencias entre el consumo mensual de referencia, el valor facturado y los totales anuales; además, la generación mensual sumada

corresponde a 17.120,2 kWh/año. Por ello, no se adopta el ahorro bruto de $8.916.721 COP como resultado validado ni se calcula un beneficio neto definitivo.

El beneficio neto operativo deberá calcularse como el ahorro real por autoconsumo de la cancha más la remuneración efectivamente reconocida por los excedentes, menos el OPEX anual. Para realizar este cálculo se necesita el perfil de consumo de la cancha y confirmar con ESSA/comercializador las condiciones de conexión, medición y reconocimiento de excedentes. El consumo agregado de las doce viviendas no se puede usar como ahorro de la instalación, puesto que estas no serán alimentadas directamente por el sistema.

5.1.5. Retorno de la inversión

No se determina un periodo simple de recuperación en esta versión, debido a que el beneficio neto anual no está validado. Calcularlo con el ahorro de la tabla K3 produciría un resultado que podría inducir a error.

$$ROI = \frac{CAPEX + OPEX}{\text{Beneficio neto}}$$

$$ROI = \frac{\$89.322.941}{\$1.916.721}$$

$$ROI \approx 46.6 \text{ años}$$

El periodo de recuperación solo podrá calcularse cuando se disponga de una estimación verificable del ahorro por autoconsumo y de los ingresos o créditos por excedentes, descontando el mantenimiento anual.

6. Conclusiones

La evaluación de los recursos energéticos renovables permitió identificar la energía solar fotovoltaica como una alternativa adecuada para estudiar el mejoramiento del suministro eléctrico en la Asociación Campesina Alto Jordán, ubicada en Vélez, Santander. La selección se

fundamentó en la caracterización de la zona, la disponibilidad del recurso solar y las necesidades energéticas de la comunidad. También se analizaron otras alternativas, como la biomasa, la energía eólica y el aprovechamiento hídrico, considerando las condiciones y limitaciones identificadas durante el estudio.

La solución propuesta consiste en instalar 16 módulos fotovoltaicos de 720 W sobre la cubierta de la cancha de microfútbol, con una potencia total de 11,52 kWp, un inversor híbrido de 10 kW y dos baterías de 5,12 kWh. El sistema se conectará al tablero eléctrico existente para priorizar el consumo de la cancha y permitir la inyección de excedentes a la red, sujeto a la aprobación del operador. Esta alternativa evita construir una nueva red de distribución hacia las viviendas y podría generar beneficios económicos para la comunidad. Antes de su implementación, deberán verificarse las condiciones estructurales de la cubierta, la compatibilidad eléctrica, las protecciones y la viabilidad económica de la propuesta.

El análisis económico del Anexo K estima una inversión inicial (CAPEX) de $82.322.941 COP y un costo anual de operación y mantenimiento (OPEX) de $7.000.000 COP. Por tanto, el costo total estimado del primer año asciende a $89.322.941 COP, antes de incorporar las partidas que aún están por cotizar, como la canalización de baterías. No se reporta un beneficio neto ni un periodo de recuperación definitivo, porque la tabla K3 presenta inconsistencias entre el consumo, los valores facturados y los totales anuales. La generación anual obtenida al sumar los meses de la tabla K2 es de 17.120,2 kWh. La evaluación económica deberá completarse con el consumo real de la cancha y la remuneración efectiva de los excedentes.

En conjunto, el trabajo permitió caracterizar las condiciones energéticas de la comunidad, comparar alternativas de generación renovable y formular una propuesta de solución fotovoltaica

ajustada a la demanda identificada. La propuesta constituye una base para avanzar hacia una posible implementación, sujeta a la verificación de los cálculos eléctricos, la compatibilidad de los equipos, la revisión de los costos y la aprobación de las condiciones de conexión por parte de ESSA.

7. Recomendaciones

Se recomienda mantener como criterio de la propuesta la utilización de la conexión eléctrica existente de la cancha, específicamente desde su tablero, para realizar el acoplamiento del sistema fotovoltaico a la red, previa verificación y aprobación de ESSA. Dado que la carga propia de la cancha es reducida frente a la generación prevista, la energía no consumida instantáneamente podrá inyectarse a la red, de acuerdo con la capacidad de exportación autorizada y las condiciones comerciales aplicables. La configuración definitiva deberá conservar las verificaciones eléctricas ya desarrolladas para los módulos y el inversor, incluyendo las tensiones de operación y de circuito abierto, los rangos MPPT y las corrientes admisibles indicadas en las fichas técnicas.

Se recomienda solicitar a ESSA la validación del punto de conexión, la capacidad de exportación permitida y los requisitos técnicos, comerciales y de medición aplicables. La conexión propuesta aprovechará el tablero y la instalación eléctrica existente de la cancha como punto de acoplamiento, sin construir una red de distribución para alimentar individualmente las doce viviendas. Se deberán revisar los planos eléctricos, las memorias de cálculo, las protecciones, la puesta a tierra, la medición bidireccional y la configuración del sistema, de acuerdo con las condiciones aprobadas por el operador de red.

Se recomienda actualizar y validar el análisis CAPEX/OPEX del Anexo K con base en el alcance definido, considerando únicamente los equipos y trabajos necesarios para conectar el

sistema fotovoltaico al tablero existente de la cancha. Los costos de una eventual red de distribución hacia las viviendas no forman parte del presupuesto seleccionado, dado que esta alternativa no se adopta por razones de viabilidad técnica y económica.

Durante la instalación se recomienda evaluar el riesgo frente a descargas atmosféricas y diseñar el apantallamiento del techo de la cancha cuando el análisis de riesgo y las condiciones del sitio lo determinen. La evaluación y las medidas de protección deberán ajustarse al RETIE vigente y a la serie NTC 4552, en particular los criterios de evaluación de riesgo y diseño del sistema de protección contra rayos, coordinando captación, bajantes, puesta a tierra, equipotencialidad y dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS). El diseño deberá ser realizado por personal competente y coordinarse con la protección de los módulos, el inversor, las baterías y los circuitos de la cancha.

Se recomienda acordar con la Asociación Campesina Alto Jordán un mecanismo transparente para administrar los valores que eventualmente se reconozcan por la energía excedente inyectada a la red. La propuesta es que dichos recursos se destinen primero, en la medida en que el esquema comercial y administrativo lo permita, a apoyar el pago de las facturas de energía de los integrantes definidos por la comunidad. Si después de esa distribución queda un saldo, su utilización deberá decidirse colectivamente. Mercedes Quiroga, como líder comunitaria, podría facilitar la gestión y la comunicación de los resultados, con registro de ingresos, pagos, saldos y decisiones. Este rol debe ser acordado por la asociación y no sustituye las autorizaciones legales o comerciales necesarias. También se recomienda capacitar a los responsables en seguimiento de generación, lectura de medidores, mantenimiento y reporte de fallas.

Referencias Bibliográficas

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2021, 7 de octubre). *Resolución CREG 174 de 2021: Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional*. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0174_2021.htm

Comisión Europea. (2024). *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR

Congreso de Colombia. (2014, 13 de mayo). *Ley 1715 de 2014: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional*. Diario Oficial No. 49.150. https://www1.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353

Congreso de Colombia. (2021, 10 de julio). *Ley 2099 de 2021: Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones*. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326

Electrificadora de Santander S. A. E. S. P. (s. f.). *Instructivo para el procedimiento de conexión de autogeneradores a pequeña escala hasta 1 MW, autogeneradores a gran escala hasta 5 MW y generadores distribuidos hasta 1 MW*. https://www.essa.com.co/site/Portals/clientes/Documentos/hogar/Autogeneracion/Instructivo-para-el-procedimiento-de-conexion-de-Autogeneradores-y-Generadores-distribuidos_v3.pdf?ver=2024-03-21-162802-580

Electrificadora de Santander S. A. E. S. P. (s. f.). *NTE-01: Conexión de autogeneradores y generadores distribuidos a los sistemas de distribución de energía eléctrica*.

https://www.essa.com.co/site/Portals/proveedores/normas-tecnicas-transicion/nte-01-conexion-de-autogeneradores-y-generadores-distribuidos-a-los-SDE.pdf?ver=2021-10-19-171300-583

Hernández Veitía, A. B., & Gentile, A. (2025). Soluciones energéticas para el sistema agroalimentario cubano gracias al fomento de la participación juvenil en las cooperativas rurales. *Cuadernos del Ciesal*, *2*(24), 1–14. https://doi.org/10.35305/cc.v2i24.153

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2008). *NTC 4552-1: Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos). Parte 1: Principios generales*. ICONTEC. https://sed4f71c7f0a07daa.jimcontent.com/download/version/1481287846/module/13346325832/name/NTC4552-1.pdf

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020). *Código eléctrico colombiano (NTC 2050): Segunda actualización*. https://tienda.icontec.org/product/codigo-electrico-colombiano-ntc-2050-segunda-actualizacion/

Meteoblue. (2025). *Mapas meteorológicos*. https://www.meteoblue.com/es/tiempo/mapas/index#coords=4/5.63/-72.95&map=windAnimation~rainbow~auto~10%20m%20above%20gnd~none

Ministerio de Minas y Energía. (2014). *Fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER)*. https://www.minenergia.gov.co/es/misional/fuentes-no-convencionales-deenerg%C3%ADa-renovable-fncer/

Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Decreto 2236 de 2023: Relacionado con las comunidades energéticas en el marco de la transición energética justa en Colombia*.

Sistema de Información Normativa del Ministerio de Minas y Energía. https://normativame.minenergia.gov.co/normatividad/6821/norma/

Ministerio de Minas y Energía. (2024). *ABC: Comunidades energéticas*. Gobierno de Colombia. https://www.minenergia.gov.co/documents/11069/ABC-ComunidadesEnergeticas-2023.pdf

Ministerio de Minas y Energía. (2024, 2 de abril). *Resolución 40117 de 2024: Por la cual se modifica el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)*. https://www.minenergia.gov.co/documents/11563/Resoluci%C3%B3n_40117_de_2024.pdf

NASA. (2024). *ArcGIS web application*. https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

Orozco-Álvarez, M., Bueno-López, M., Calpa Yepes, M., & Andela Medina, J. A. (2025). Navegando por las comunidades energéticas: La articulación del diseño y la ingeniería por la democratización de la energía. *Signo y Pensamiento*, *44*. https://doi.org/10.11144/Javeriana.syp44.ncea

Parlamento Europeo. (2025). *Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources*. *Official Journal of the European Union*. https://eurlex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj/eng

Piedrahita Tamayo, N. (2024, 11 de junio). Una molécula limpia para generar energía. *Alma Mater*, Universidad de Antioquia. https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/udea-noticias/udea-noticia/contenido/asnoticias/periodicoalmamater/hidrogeno-blanco-pam737/

Unidad de Planeación Minero Energética. (2022). *Resumen ejecutivo: Plan energético nacional (PEN) 2022-2052*. Ministerio de Minas y Energía.

https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2022_2052/Resumen_ejecutivo_PEN_2022_2052.pdf

Valderrama, P. A., Castro, A., Borda, C. A., Durango, S., & Vásquez, D. (2025). *Perfil del proyecto: Fortalecimiento comunidades energéticas con fuentes no convencionales de energía renovable en el departamento de Caquetá*. Bioversity International e International Center for Tropical Agriculture (CIAT). https://alliancebioversityciat.org/publications-data/perfil-del-proyecto-fortalecimiento-comunidades-energeticas-con-fuentes-no