

Diseño Conceptual Basado En Un Análisis De Alternativas Técnicas Para Comunidad
Energética Tamarindos Club En La Ciudad De Barrancabermeja

Christiam José Daniel Hernández Díaz, Emily Narvaez Castellanos y José Duván Ruiz Ribero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingenieros Electricistas

Director

Manuel José Ortiz Rangel

Ingeniero Electricista, Esp. ST&D, MIE

Codirector

Gabriel Ordoñez Plata

Doctor en Ingeniería Industrial, área Ingeniería Eléctrica

Diana María Villalobos Orduz

Ingeniera Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctricas, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A nuestras familias, pilares fundamentales de nuestro crecimiento y apoyo incondicional en cada paso de este camino:

A nuestros padres, por su amor, sacrificio y enseñanzas que nos han guiado hasta aquí. A nuestros hermanos y seres queridos, por su compañía y motivación en los momentos de desafío.

De manera especial, dedicamos este logro a:

Nuestro director, Manuel José Ortiz Rangel, por su invaluable orientación, paciencia y conocimiento compartido durante todo el proceso.

Nuestros codirectores, Gabriel Ordoñez Plata y Diana María Villalobos Orduz, por su dedicación y acompañamiento en la construcción de este trabajo.

Este proyecto es el resultado de un esfuerzo colectivo, y con profunda gratitud, lo compartimos con todos aquellos que creyeron en nosotros y contribuyeron a hacerlo realidad.

Emily, Christiam y Duván

Agradecimientos

A Dios dar gracias primeramente por el regalo vida y salud en el recorrido de esta hermosa carrera, por permitirme siempre aprender lo mejor para la vida personal y profesional. A mis padres por su amor, esfuerzo y dedicación para apoyarme en todo. A mi esposa y mi hija por ser ese pilar de fuerza y motivación para seguir adelante en todo lo que emprendo, dado que con sus palabras de amor y comprensión me ayudan. A mis compañeros de trabajo de grado por enseñarme lo valioso que es el trabajo en equipo y el aprender de cada uno de ellos en este proceso.

Christiam Hernandez Diaz.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas y entidades que contribuyeron en mi proceso; a la UIS por brindarme la oportunidad de estudiar y crecer académicamente en un entorno enriquecedor y desafiante, a mi familia por su apoyo incondicional y motivación.

A la ESSA y a la sociedad San Vicente de Paúl por otorgarme la beca que me permitió continuar mis estudios y realizar mis prácticas universitarias.

A mis compañeros de clase por su amistad y colaboración en especial a mis compañeros de trabajo de grado, a mis profesores y directores de trabajo de grado, por su guía y orientación.

Finalmente agradecerle a Dios por estar conmigo en todo momento y ayudarme cuando más lo necesitaba. Este logro no habría sido posible sin la presencia de todos ustedes, los llevaré por siempre en mi corazón.

Emily Narvaez Castellanos.

Agradecimientos

Este logro no sería posible sin el invaluable apoyo y la constante inspiración de personas fundamentales en mi vida. A ellas, extendiendo mi más profundo agradecimiento.

En primer lugar, a mis amados padres, pilar incondicional y fuente inagotable de amor, motivación y sacrificio. Gracias por su fe ciega en mí, por cada esfuerzo, cada consejo y por ser el ejemplo de perseverancia que siempre me impulsó a seguir adelante. Este trabajo es también suyo.

A todas aquellas personas que, con su cercanía y apoyo, iluminaron mi camino en cada etapa de este proceso. Gracias por su paciencia, su comprensión y por ser un refugio en los momentos de incertidumbre y desafío. Su presencia fue un aliento constante.

Mi gratitud se extiende a todos aquellos que, de una u otra manera, tendieron una mano amiga y me brindaron su ayuda en los momentos difíciles. Ya sea con una palabra de aliento, una guía oportuna o un simple gesto de apoyo, su contribución fue fundamental para superar los obstáculos.

A todos los profesores, cuyo conocimiento, dedicación y pasión por la enseñanza no solo nutrieron mi formación académica, sino que también inspiraron mi crecimiento personal y profesional. Sus valiosas orientaciones fueron clave para la culminación de este proyecto.

Finalmente, a mis amigos y compañeros, por las risas compartidas, por la camaradería, por el apoyo mutuo en las largas jornadas de estudio y por hacer de este recorrido universitario una experiencia memorable. Su compañía hizo el camino mucho más ameno.

A todos ustedes, mi sincero y eterno agradecimiento.

José Duván Ruiz Ribero.

Tabla de contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. CUERPO DEL TRABAJO	15
2.1 Marco Referencial.....	16
2.1.1. Marco legal	16
2.1.2. Marco conceptual.....	17
2.1.3. Marco teórico	18
2.2. Método	20
2.2.1. Criterios técnicos y económicos	20
2.2.2. Análisis de alternativas para el suministro de energía	25
2.2.3. Análisis comparativo técnico-económico de las alternativas propuestas	31
2.2.4. Ingeniería Básica del Sistema Fotovoltaico.....	38
2.2.5. Modelo de gestión de gestión energética comunitaria.....	40
3. CONCLUSIONES	41
4. RECOMENDACIONES.....	41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
APÉNDICES.....	47

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Datos de irradiación para la comunidad-	22
Tabla 2. Características del panel ZXM8-TPLDD120.	24
Tabla 3. Análisis económico primera alternativa.....	34
Tabla 4. Análisis económico segunda alternativa.....	35
Tabla 5. Análisis económico segunda alternativa con fondo comunitario.	35
Tabla 6. Análisis económico tercera alternativa.	36
Tabla 7. Análisis de las tres alternativas.....	37
Tabla 8. Equipos.	39
Tabla 9. Estimación de generación fotovoltaica.....	40

Lista de Figuras

Figura 1. Consumo energético de la comunidad.....	26
Figura 2. Esquema unifilar.....	39

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice 1. Analisis de alternativas.....	47
Apéndice 2. Fichas técnicas.....	47
Apéndice 3. Google earth	47
Apéndice 4. Modelo de gestión energética.....	47
Apéndice 5. Simulación para grupos dentro de la comunidad.....	48
“Los apéndices están adjuntos”	

Glosario

Autogeneración colectiva (AGRC): actividad realizada por la comunidad energética que produce energía, principalmente para atender su propia demanda energética. En el evento en que se generen excedentes de energía a partir de tal actividad, estos podrán entregarse a la red, en los términos que establezca la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) para tal fin.

Comunidades energéticas: Grupo de usuarios que se organizan para generar, gestionar y consumir energía de manera colectiva, generalmente a partir de fuentes renovables, con el objetivo de optimizar costos, mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental.

Energía exportada: cantidad de energía entregada a la red por un autogenerador colectivo o un generador distribuido colectivo.

Fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER): aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente.

Generación Distribuida Colectiva (GDC): es la producción de energía eléctrica realizada por la comunidad energética, cerca de los centros de consumo, conectada a un sistema de distribución local (SDL) o a una microrred

Microrred: (red local de producción y distribución de energía) sistema eléctrico que integra la demanda (cargas) y los recursos energéticos distribuidos con la capacidad de operar durante un periodo de tiempo y con diferentes niveles de automatización y de coordinación, bien sea de modo aislado o interconectado a una red principal, bajo criterios técnicos, económicos, ambientales y socioculturales.

Resumen

Título: Diseño conceptual basado en un análisis de alternativas técnicas para comunidad energética Tamarindos Club en la ciudad de Barrancabermeja.

Autor: Christian José Daniel Hernández Díaz, Emily Narvaez Castellanos y José Duván Ruiz Ribero*

Palabras Clave: Comunidad energética, Diseño Conceptual, Energía, Paneles Solares Fotovoltaicos.

Descripción: Este proyecto se centra en el diseño conceptual de un sistema fotovoltaico para crear una comunidad energética en Tamarindos Club, Barrancabermeja. Nos basamos en el Decreto 2236 de 2023 del Ministerio de Minas y Energía, una normativa clave que impulsa estas comunidades. Hemos evaluado tres alternativas técnicas para el diseño del sistema: una solución centralizada con inversor central, un sistema distribuido con micro-inversores, y una opción de pequeños sistemas distribuidos o por grupos con inversores string. Por cada alternativa, analizamos en detalle la configuración de los equipos, cómo se conectan a la red, posibles estrategias para gestionar la energía y, muy importante, sus ventajas y desventajas técnico-económicas. El estudio incluye la ingeniería básica del sistema, considerando las particularidades ambientales de Barrancabermeja, tanto geográficas como climáticas. También realizamos un análisis profundo de los patrones de consumo energético tanto de cada usuario individual como de la comunidad en general. Con esta investigación, buscamos hacer una contribución significativa al desarrollo de modelos energéticos sostenibles y participativos en Colombia. Tenemos en cuenta las normativas nacionales sobre transición energética y las ambiciosas metas de descarbonización del país. Además, este proyecto aspira a ser un modelo replicable para diseñar comunidades energéticas en otros contextos urbanos similares a lo largo de Colombia, incentivando el uso de nuestros recursos naturales y promoviendo la generación distribuida para reducir costos energéticos y apoyar la descarbonización nacional.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenieras Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Director: Manuel José Ortiz Rangel, MIE. Codirector: Gabriel Ordoñez Plata, Doctor en ingeniería industrial y Diana María Villalobos Orduz, Ingeniera química.

Abstract

Title: Conceptual design based on an analysis of technical alternatives for the Tamarindos Club energy community in the city of Barrancabermeja.

Author: Christiam José Daniel Hernández Díaz, Emily Narvaez Castellanos y José Duván Ruiz Ribero*

Key Words: Energy community, Conceptual Design, Energy, Photovoltaic Panels

Description: This project focuses on the conceptual design of a photovoltaic system to create an energy community in Tamarindos Club, Barrancabermeja. Our work is based on Decree 2236 of 2023 from the Ministry of Mines and Energy, a key regulation that promotes these communities. We've evaluated three technical alternatives for the system's design: a centralized solution with a central inverter, a distributed system with microinverters, and an option for small distributed or group systems with string inverters. For each alternative, we've analyzed in detail the equipment configuration, grid connection methods, potential energy management strategies, and, crucially, their technical-economic advantages and disadvantages. The study includes the basic system engineering, considering Barrancabermeja's specific environmental characteristics, both geographical and climatic. We also conducted an in-depth analysis of energy consumption patterns for both individual users and the community as a whole. With this research, we aim to make a significant contribution to the development of sustainable and participatory energy models in Colombia. We've considered national regulations on energy transition and the country's ambitious decarbonization goals. Furthermore, this project aspires to be a replicable model for designing energy communities in similar urban contexts across Colombia, encouraging the use of our natural resources and promoting distributed generation to reduce energy costs and support national decarbonization efforts.

* Degreen work

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering, Director: Manuel José Ortiz Rangel, MIE Co-Directors: Gabriel Ordoñez Plata Doctor of Industrial Engineering, and Diana Maria Villalobos Orduz Chemical Engineer.

Introducción

La evolución tecnológica en la generación de energía ha conducido al desarrollo de los actuales sistemas renovables, donde la sostenibilidad es, sin duda, una prioridad. En este camino, las comunidades energéticas se presentan como una solución clave para lograr la autosuficiencia, generando energía limpia de forma distribuida. En Colombia, el incremento en el uso de tecnología solar fotovoltaica se debe a la alta radiación solar y a políticas de fomento a las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER). De hecho, se espera que para 2030, el 10% de nuestra energía provenga de estas fuentes (Ministerio de Minas y Energía, 2023).

En Tamarindos Club, un conjunto residencial en Barrancabermeja conformado por 45 viviendas familiares y alrededor de 250 habitantes, con una cancha de microfútbol para la comunidad, la situación no es diferente. Si bien algunas viviendas presentan condiciones estructurales que no son las más adecuadas, existe la posibilidad de mejorarlas o adaptar nuevas estructuras para reforzar estas deficiencias. Además, los recursos ambientales óptimos y la necesidad de reducir costos facilitan el promover este tipo de soluciones energéticas. Allí, los recursos ambientales óptimos y la necesidad de reducir costos facilitan el promover este tipo de soluciones. Esto lleva a la siguiente pregunta: ¿Cómo puede el desarrollo e implementación de un sistema solar fotovoltaico de Autogeneración Colectiva (AGRC)* reducir los costos energéticos y promover la sostenibilidad ambiental en Tamarindos Club, en Barrancabermeja, Santander?

La generación solar fotovoltaica se presenta como una opción altamente favorable para Tamarindos Club. Facilita la Autogeneración Colectiva (AGRC), lo cual no solo reduce los

*AGRC: Actividad de una comunidad energética que produce electricidad para su propio consumo. Si se generan excedentes, estos pueden ser entregados a la red bajo las regulaciones de la CREG.

costos, sino que también contribuye a la disminución de emisiones y al cumplimiento de las metas nacionales, en línea con el Decreto 2236 de 2023 (Presidencia de la República de Colombia, 2023). El objetivo principal con este proyecto es, precisamente, desarrollar ese sistema. Para ello, se analizó el consumo de energía de los usuarios, la disponibilidad de espacios (con base a la visita técnicas de la UIS-UPME)* y, por supuesto, el recurso solar. Se han evaluado tres alternativas – centralizada, distribuida y pequeños sistemas distribuidos–, análisis que se desglosa en la sección 2.2.2. Análisis de alternativas para el suministro de energía, buscando la que mejor se adapte a las particularidades de la comunidad.

Se busca que tenga un impacto positivo tanto en el ámbito energético como en el social. Resolverá el problema de los altos costos y la dependencia energética en Tamarindos Club, además, sentará un precedente replicable para otras comunidades. Contribuirá a diversificar la matriz energética colombiana y a mejorar el bienestar económico y social de los residentes, fomentando su participación y la sostenibilidad. Se aplicó un enfoque cuantitativo, que combinó un análisis técnico-económico con las necesidades específicas de la comunidad para encontrar la solución más adecuada.

*Alcance convenio UIS-UPME se centra en la caracterización inicial de la Comunidad Energética Tamarindos Club.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Elaborar la ingeniería básica del sistema de generación solar fotovoltaico para la comunidad de Tamarindos Club ubicado en el Municipio de Barrancabermeja, Santander, en el contexto del decreto 2236 de 2023 expedido por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia.

1.2 Objetivos Específicos

Definir los criterios técnicos y operativos para el diseño del sistema fotovoltaico comunitario, considerando los datos existentes de consumo energético y condiciones meteorológicas de Tamarindos Club.

Desarrollar al menos tres alternativas técnicas de diseño para el sistema fotovoltaico comunitario, considerando diferentes configuraciones de equipos, tecnologías, esquemas de integración a la red existente y estrategias de gestión y distribución de la energía generada.

Realizar un análisis comparativo técnico-económico de las alternativas propuestas, incluyendo criterios de viabilidad financiera, retorno de inversión y beneficios para los residentes.

Elaborar la ingeniería básica de la alternativa seleccionada, incluyendo el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, los esquemas unifilares, listado de equipos principales y estimación de generación energética.

Desarrollar un modelo de gestión energética comunitaria que defina los esquemas de medición y facturación, los protocolos de operación y mantenimiento, los roles y responsabilidades de los participantes y mecanismos de distribución de beneficios.

2. Cuerpo del Trabajo

2.1 Marco Referencial

2.1.1. Marco legal

El diseño del sistema de generación solar fotovoltaica para la comunidad energética Tamarindos Club se fundamenta en el marco normativo colombiano, que regula la implementación de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), las comunidades energéticas y los sistemas eléctricos. A continuación, se describen las principales normativas aplicables:

2.1.1.1. Decreto 2236 de 2023

El Decreto 2236 de 2023, emitido por el Ministerio de Minas y Energía, adiciona al Decreto 1073 de 2015 disposiciones para regular parcialmente el artículo 235 de la Ley 2294 de 2023 del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, en el contexto de la Transición Energética Justa en Colombia. Este decreto define las comunidades energéticas como agrupaciones de individuos o entidades, públicas o privadas, que colaboran mediante acuerdos para realizar actividades como la producción, venta y aprovechamiento eficiente de energía utilizando FNCER, combustibles renovables y recursos energéticos distribuidos. Los excedentes de energía generados pueden ser entregados a la red eléctrica, conforme a las regulaciones de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). El decreto asigna responsabilidades específicas a diversas entidades:

Ministerio de Minas y Energía: Establece parámetros de capacidad de instalación, mecanismos de sostenibilidad, dispersión geográfica, registro de comunidades energéticas, criterios para acceder a fondos públicos, un centro de transparencia e información, y directrices para la inversión, mantenimiento y operación de sistemas de generación.

Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME): Define las condiciones de acceso y conexión a las redes eléctricas.

Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG): Regula las condiciones de prestación del servicio por parte de las comunidades energéticas, incluyendo los esquemas de compensación para excedentes energéticos de autogeneradores colectivos y generadores distribuidos colectivos.

Superintendencia de Servicios Públicos: Supervisa, controla y vigila la prestación de servicios por parte de las comunidades energéticas.

Resolución CREG 174 de 2021: Establece las condiciones para la entrega de excedentes de energía al SIN por parte de autogeneradores y generadores distribuidos, incluyendo esquemas de medición neta y compensación económica.

Plan Nacional de Energía Renovable (PNER): Define metas para incrementar la participación de FNCER en la matriz energética colombiana, proyectando que para 2030 el 10% de la energía provendrá de fuentes renovables.

2.1.2. Marco conceptual

2.1.2.1. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE 2024)

El RETIE 2024, actualizado por el Ministerio de Minas y Energía, establece los requisitos técnicos y de seguridad para el diseño, instalación, operación y mantenimiento de sistemas eléctricos en Colombia, incluyendo aquellos que integran fuentes renovables como la energía solar fotovoltaica. Este reglamento garantiza instalaciones seguras, eficientes y alineadas con estándares de calidad. En el contexto de Tamarindos Club, el RETIE 2024 será fundamental para el diseño de la microrred comunitaria y el sistema fotovoltaico, asegurando el cumplimiento de normas sobre protecciones eléctricas, puesta a tierra y compatibilidad con la red existente.

2.1.2.2. Ley 1715 de 2014

La Ley 1715 de 2014 regula la integración y promoción de FNCER en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y en Zonas No Interconectadas (ZNI). Esta ley establece incentivos

tributarios, como exenciones de IVA y aranceles para equipos de generación renovable, y fomenta la autogeneración y la generación distribuida. En el caso de comunidades energéticas, la Ley 1715 facilita el acceso a tecnologías solares fotovoltaicas y promueve modelos de financiación para proyectos como el de Tamarindos Club.

2.1.3. Marco teórico

2.1.3.1. Comunidades Energéticas

Una comunidad energética es un modelo de organización que permite a un grupo de usuarios gestionar colectivamente la generación, distribución y consumo de energía, generalmente utilizando fuentes renovables. Este modelo fomenta la autosuficiencia energética, reduce la dependencia de la red eléctrica convencional y promueve la sostenibilidad ambiental (Ministerio de Minas y Energía). En Colombia, el marco legal para estas comunidades se ha fortalecido con la Ley 2294 de 2023 (Plan Nacional de Desarrollo), que introdujo el concepto, y el Decreto 2236 de 2023, que lo reglamenta, definiendo su operación y las facultades de la CREG y el Ministerio de Minas y Energía para su regulación y registro. En el contexto de Tamarindos Club, la comunidad energética se basa en el concepto de Autogeneración Colectiva (AGRC), donde múltiples usuarios comparten un sistema de generación solar fotovoltaica y distribuyen los beneficios de la energía generada.

Las comunidades energéticas se caracterizan por:

Participación activa: Los miembros de la comunidad toman decisiones colectivas sobre la gestión energética.

Generación distribuida: La energía se produce cerca del punto de consumo, minimizando pérdidas por transmisión.

2.1.3.2. Sistemas Fotovoltaicos y Autogeneración Colectiva (AGRC)

Un sistema fotovoltaico convierte la radiación solar en electricidad mediante paneles solares, inversores, sistemas de almacenamiento (opcional) y equipos de control. En el caso de Tamarindos Club, la alta radiación solar promedio de Barrancabermeja, estimada en 5.0-5.5 kWh/m²/día según datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), hace viable la implementación de esta tecnología.

La Autogeneración Colectiva (AGRC), regulada por el Decreto 2236 de 2023, permite que un grupo de usuarios comparta un sistema de generación renovable, distribuyendo la energía generada proporcionalmente según acuerdos predefinidos. Este modelo es ideal para comunidades residenciales como Tamarindos Club, ya que reduce los costos iniciales por usuario, optimiza el uso del espacio para paneles solares y maximiza los beneficios económicos

Los componentes principales de un sistema fotovoltaico comunitario incluyen:

Paneles solares: Convierten la radiación solar en electricidad de corriente continua (CC).

Inversores: Transforman la corriente continua en corriente alterna (CA) compatible con la red y los consumos domésticos

Medición: Monitorean la generación y el consumo para garantizar una distribución equitativa de la energía.

Montaje y cableado: Aseguran la instalación segura y eficiente de los paneles, cumpliendo con el RETIE 2024.

Microrredes Comunitarias: Una Microrred es un sistema eléctrico localizado que puede operar de manera conectada o desconectada de la red principal, integrando fuentes de generación, almacenamiento y consumo. En el contexto de Tamarindos Club, la microrred comunitaria permitirá: Compartir excedentes de energía entre los residentes, garantizar la continuidad del

suministro en caso de fallos en la red principal, optimizar la gestión energética mediante sistemas de control inteligente.

El diseño de la microrred debe cumplir con los requisitos del RETIE 2024, incluyendo protecciones eléctricas, sistemas de puesta a tierra y compatibilidad con la infraestructura existente.

2.1.3.3. Condiciones Ambientales en Barrancabermeja

Barrancabermeja, ubicada en el departamento de Santander, presenta condiciones ideales para la generación solar fotovoltaica debido a su alta radiación solar y clima tropical. Según el IDEAM, la región tiene una radiación solar promedio de 5.0-5.5 kWh/m²/día, con mínimas variaciones estacionales. Estas condiciones, combinadas con la disponibilidad de espacios en Tamarindos Club (como techos de edificios), hacen viable la instalación de un sistema fotovoltaico comunitario.

2.2. Método.

2.2.1. Criterios técnicos y económicos

Para el diseño de un sistema fotovoltaico comunitario eficiente y sostenible se requiere de la definición precisa de criterios técnicos y operativos, considerando datos de consumo energético y condiciones meteorológicas locales. En este contexto, se han examinado los datos de consumo energético específicos del barrio Tamarindos Club y las condiciones climatológicas de la región de Barrancabermeja, con el objetivo de estructurar un diseño ajustado a la demanda energética de los usuarios.

2.2.1.1. Criterios Técnicos del Diseño

2.2.1.1.1. Demanda energética real: Según la matriz de consumo del conjunto residencial Tamarindos Club, proporcionada por la Electrificadora de Santander (ESSA), se observaron los valores de consumo en kWh correspondientes a 45 cuentas, de los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre del año 2024, con datos de consumo mensual por cuenta y registro del macro-medidor del transformador asociado a la comunidad por el operador de red. A partir de esta información, se realizó una caracterización detallada del consumo energético, utilizando los registros del macro-medidor comunitario. De acuerdo con los datos obtenidos, se determina que la comunidad consume, en promedio, aproximadamente 10,836.25 kWh/mes.

2.2.1.1.2. Radiación solar disponible: Para este estudio, se registraron datos específicos correspondientes a la región de Barrancabermeja, Santander, en la zona donde se encuentra ubicada la comunidad energética potencial. Utilizando la página web Atlas Solar Mundial, se obtuvieron los datos de irradiación para la ubicación exacta de la comunidad, considerando las coordenadas geográficas (7°04'59" N, 73°83'94" W). Los valores obtenidos fueron los siguientes: Irradiación normal directa (DNI): 3.571 kWh/m² por día; Irradiación horizontal global (GHI): 5.258 kWh/m² por día; Irradiación horizontal difusa: 2.605 kWh/m² por día; Irradiación inclinada global en un ángulo óptimo (GTI óptimo): 5.295 kWh/m² por día; Inclinación óptima de los módulos fotovoltaicos: 8°/180°; Temperatura del aire: 24.7 °C; Irradiación global horizontal diaria: 1,762.34 kWh/m²/día; Período más luminoso: De enero a marzo, con radiaciones por encima de 5.4 kWh/m²/día.; Período menos luminoso: De septiembre a diciembre, con radiaciones promedio de 4.4 kWh/m²/día.

Tabla 1

Datos de irradiación para la comunidad

Concepto	Valor	Unidad
Irradiación normal directa (DNI)	3.571	kWh/m ² /día
Irradiación horizontal global (GHI)	5.258	kWh/m ² /día
Irradiación horizontal difusa	2.605	kWh/m ² /día
Irradiación inclinada global en ángulo óptimo (GTI)	5.295	kWh/m ² /día
Inclinación óptima de los módulos fotovoltaicos	8° / 180°	°
Temperatura del aire	24.7	°C
Irradiación global horizontal diaria	1,762.34	kWh/m ² /día
Periodo más luminoso Enero a Marzo	>5,4	kWh/m ² /día
Periodo menos luminoso Septiembre a Diciembre	4.4	kWh/m ² /día

Tabla 1. Datos de irradiación para la comunidad.

Adicionalmente, se consultó el Mapa de Radiación de Colombia, donde se obtuvo un valor de radiación para Barrancabermeja, Santander, de 4.59 kWh/m²/día.

2.2.1.1.3. Tecnología fotovoltaica: Para el sistema de generación fotovoltaica propuesto, se ha optado por la implementación de paneles solares monocristalinos de alta eficiencia, debido

a su excelente desempeño en condiciones climáticas cálidas y húmedas, como las que predominan en la región. Este tipo de tecnología ofrece una mayor eficiencia en la conversión de energía solar en electricidad, así como una vida útil más prolongada y un mejor aprovechamiento del espacio disponible.

El panel seleccionado (Panel solar de 600 Wp; modelo ZXM8-TPLDD120 Series) y presenta las siguientes especificaciones técnicas: una potencia nominal (P_{max}) de 600 Wp, con un voltaje a máxima potencia (V_{mp}) de 34.5 V y una corriente a máxima potencia (I_{mp}) de 13.11 A. Su voltaje en circuito abierto (V_{oc}) es de 41.5 V y su corriente de cortocircuito (I_{sc}) alcanza los 18.33 A.

Cada panel tiene un peso de 35 kg y unas dimensiones de 2.172 mm de largo, 1.303 mm de ancho y 35 mm de grosor, lo que representa un área total de 2.83 m². El costo unitario estimado de cada módulo es de \$450.000. Este tipo de panel representa una solución eficiente y confiable para satisfacer la demanda energética de la comunidad. Ver Apéndice 2.

Tabla 2

Ficha técnica del panel ZXM8-TPLDD120

Concepto	Valor	Unidad
P_{max}	600	Wp
V_{mp}	34.5	V
I_{mp}	13.11	A
V_{oc}	41.5	V
I_{sc}	18.33	A
Peso	35	kg
Largo	2.172	mm

Ancho	1.303	mm
Grosor	33	mm

Tabla 2. Características del panel ZXM8-TPLDD120.

2.2.1.2. Criterios Operativos

2.2.1.2.1. Gestión de la energía

Como objetivo se tiene el optimizar el autoconsumo y la compensación de excedentes dentro de la misma comunidad para hacer un uso eficiente y óptimo de la generación de energía.

2.2.1.2.1.1. Distribución de energía

Priorizar autoconsumo instantáneo en horas de generación (9am - 3pm): con el fin de usar la energía que se genera a través de los paneles e interactuar poco con intercambios de energía entre la comunidad y la red.

Intercambios de energía entre usuarios de la comunidad: Hacer transacciones de energía entre usuarios para mantener la energía generada como un autoconsumo de la comunidad y optimizar la generación antes de crear intercambios entre la red y la comunidad.

2.2.1.2.1.2. Algoritmo de reparto: Asignación proporcional basada en:

Consumo histórico por vivienda (kWh/mes): aquellos usuarios que consuman más energía, idealmente, debería entrar en las horas que se tenga disponibilidad de luz solar a consumir a plena carga

Participación en la inversión inicial: entre los usuarios se puede crear un fondo de inversión para promover la construcción de la solución fotovoltaica para generar energía dentro de la misma comunidad.

2.2.1.2.1.3. Herramientas:

Plataforma de monitoreo en tiempo: En donde se tenga el registro histórico de intercambios de energía entre los sistemas de generación solar, la red eléctrica y los consumidores

Contratos inteligentes para transparencia en reparto: Entre la comunidad energética se pueden crear tratos y acuerdos con el fin de manejar los intercambios de energía. De esta manera se puede ofrecer beneficios económicos o energéticos a usuarios que consumen cuando hay exceso de generación.

2.2.1.2.2. Modelo de Gestión Comunitaria

2.2.1.2.2.1. Estructura organizacional:

Comité energético: 1 representante por cada 10 viviendas y reuniones mensuales para revisar la distribución de beneficios económicos y alertas de mantenimiento.

Fondo comunitario: 20% de los ahorros generados se destinan al mantenimiento preventivo y expansión futura del sistema.

2.2.1.2.2.2. Estructura Capacitación:

Talleres trimestrales sobre: Lectura de medidores y plataforma de monitoreo, limpieza segura de paneles y respuesta a emergencias.

2.2.2. Análisis de alternativas para el suministro de energía

Se han considerado tres opciones de diseño para la instalación de un sistema fotovoltaico eficiente y adaptado a las condiciones particulares de la comunidad Tamarindos Club. Por medio de la matriz energética suministrada por la Electrificadora de Santander (ESSA), donde se tienen registros de consumo de energía de cada usuario y el registro del macromedidor del transformador

de la comunidad (tabla #1), los datos fueron brindados bajo acuerdo de confidencialidad. Se aclara que para cualquiera de las alternativas se hace necesario el cambio del macromedidor del barrio por uno bidireccional que permita registrar los flujos de potencia que se tengan en el punto de conexión. Además, se evaluará cada alternativa teniendo en cuenta su capacidad técnica, los gastos de instalación y mantenimiento, la eficiencia energética, el impacto en la comunidad y la simplicidad de integración con la infraestructura eléctrica ya existente.

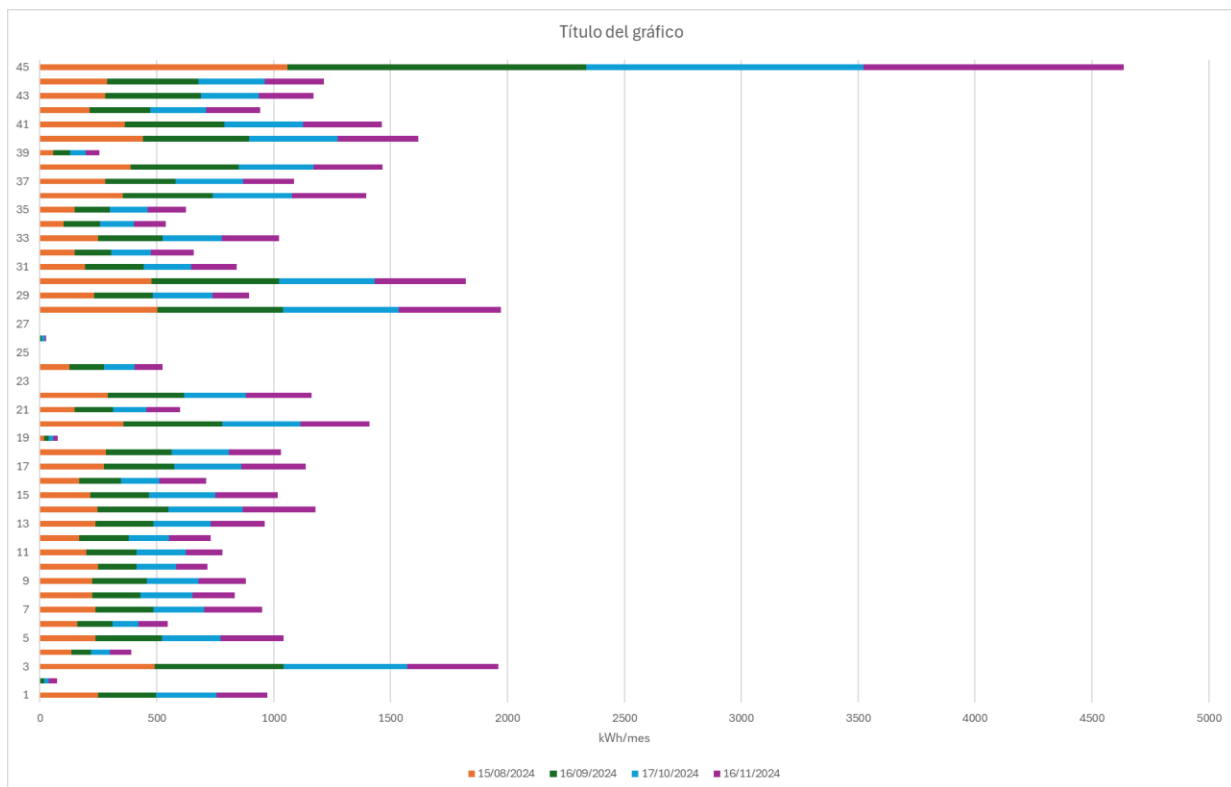


Figura 1. Consumo energético de la comunidad.

2.2.2.1. Sistema de Generación Centralizado: Esta alternativa propone un sistema fotovoltaico centralizado donde todos los paneles se ubican en una única área común, como lo puede ser un terreno comunitario, talud y/o cancha que se encuentran ubicados en el barrio de Tamarindos Club, o techos de áreas comunes del conjunto residencial.

Para llevar a cabo esta alternativa se usa un inversor central, o un conjunto de inversores, de gran capacidad con sistemas de monitoreo integrado con el que se le dará uso a la energía generada por los paneles. Contando con paneles solares monocristalinos de alta eficiencia para aprovechar al máximo la producción de energía, orientados 10° con respecto (sur). Esta energía se inyectaría a través de la red de media tensión y transformador asociado de 75 kVA a la comunidad energética con la cual se encuentra conectada la comunidad, para este fin sería necesario cambiar tanto el tipo de cuenta como la frontera comercial a una donde figure la comunidad como agente generador a pequeña escala (AGPE). En esta alternativa se debe tener en cuenta los límites establecidos por el Operador de Red, ESSA, que no permite la conexión de un AGPE donde su potencia nominal supere el 50% de la potencia nominal del transformador al cual va a ser conectado.

El modelo de gestión energética que puede aplicarse para esta alternativa estaría basado en un sistema de facturación automatizado que calcula los descuentos en la factura de cada miembro, tomando de base que cada miembro es un participante activo en la constitución y conformación de la comunidad energética del barrio Tamarindos club.

Las ventajas que se pueden reconocer en esta primera alternativa pueden ser un menor costo por kW instalado, una mayor eficiencia del sistema en términos de un control globalizado y localizado y los costos asociados en instalación y mantenimiento. Mientras que algunas desventajas son como la vulnerabilidad ante fallas ya que perjudica el sistema en su totalidad pudiendo hacer que se salga de servicio todo el complejo. Además de tener que garantizar un espacio amplio que pertenezca a la comunidad, el cual debe disponer para la disposición del sistema fotovoltaico.

2.2.2.2. Sistema Distribuido: Esta alternativa propone distribuir la instalación fotovoltaica en cada una de las viviendas usando el espacio disponible en cada uno de los techos, disponiendo de manera individualizada el consumo para el dimensionamiento del sistema de cada uno. Para esta alternativa se analiza el tipo de consumo de cada una de las viviendas, lo cual va a ser útil para dimensionar el sistema fotovoltaico que se ajuste a las necesidades propias de la vivienda.

Con paneles solares de eficiencia alta distribuidos por los techos de las viviendas con micro-inversores en cada uno de ellos para aprovechar aquellas configuraciones que cuentan con pocos paneles. Para este caso la medición se realizará por un algoritmo que computa la información registrada por cada micro-inversor, la información que se puede extraer del medidor propio de cada vivienda, unidireccional, y la información del macromedidor de la comunidad. De esta manera se puede hacer el cómputo de los flujos positivos, energía tomada de la red, y flujo negativo, energía entregada en exceso por el sistema de cada usuario. En esta alternativa se tiene el beneficio de que la energía que no se usa en un usuario se usa para alimentar las necesidades energéticas de los demás usuarios de la comunidad, para poder cuantificar estos cruces de energía se debe tener un modelo de gestión energético que permita evaluar la capacidad de entrega de energía que cada usuario va a tener, las necesidades energéticas de cada uno de los usuarios y el cruce de esta información en tiempo real; además, la comunidad debe conformar un comité que imponga las cuotas adecuadas para realizar el cálculo del costo asociado a este cruce de energía entre usuarios. Al final se tendrá esta información de cada uno de los usuarios, la cual se computa con la información propia del macromedidor que debe empatar y concordar con la energía que la comunidad ha requerido de la red.

La integración de esta alternativa se haría directamente en cada usuario mediante los tableros de distribución, aprovechando la interconexión propia de la comunidad mediante las redes

del operador de red para el intercambio de energía entre usuarios. Además, se adaptaría un sistema de comunicación para que la información de los micro-inversores se pueda estar recibiendo de manera continua tanto por los usuarios como por el operador de red.

Para el sistema de gestión se implementaría un sistema de gestión energética comunitario para realizar el balance entre la producción del sistema fotovoltaico individual, los cruces energéticos entre la comunidad y el consumo total al final de mes visto por el macromedidor. Para la cual se hace necesario implementar un algoritmo de reparto dinámico según producción individual y consumo en tiempo real.

Las ventajas de esta alternativa que se pueden apreciar son que cada usuario tiene la libertad de hacer parte o no de la comunidad desde un aporte individual a la misma y la posibilidad de crecer el sistema solar de manera progresiva. Algunas de las desventajas pueden ser el costo asociado a la inversión inicial, ya que no todos los usuarios pueden llegar a contar con los recursos adecuados para hacer parte de la comunidad energética, la complejidad de la instalación y el mantenimiento de un sistema de manera individualizada.

2.2.2.3. Pequeños Sistemas Distribuidos: Esta alternativa propone distribuir la instalación fotovoltaica en múltiples ubicaciones, principalmente en los techos de las viviendas participantes, pero interconectadas para formar una comunidad energética.

Para esta alternativa se toma un conjunto entre 4 o 5 viviendas que se encuentren estratégicamente ubicadas, una seguida de la otra, se analiza el tipo de consumo de cada una de ellas y del conjunto que se forma para crear una nueva curva de consumo y de esta manera poder realizar un dimensionamiento del sistema fotovoltaico apto para este conjunto de viviendas, los cuales se clasifican por grupos. (Ver Apéndice 1).

En esta alternativa se usan varios inversores string, uno por cada grupo de usuarios conformados, de tal manera que haya una interconexión entre todos ellos. Con paneles solares de alta eficiencia distribuidos por los techos de los grupos de viviendas. Para este caso la medición se realizará por un algoritmo que computa la información registrada por cada inversor, la información que se puede extraer del medidor propio de cada vivienda, unidireccional, y la información del macromedidor de la comunidad. De esta manera se puede hacer el cómputo de los flujos positivos, energía tomada de la red, y flujo negativo, energía entregada en exceso por el sistema de cada grupo. Al final se tendrá esta información de cada uno de los grupos, la cual se computa con la información propia del macromedidor, la cual debe empatar y concordar con la energía que la comunidad ha requerido de la red. Con este procedimiento se busca evitar cambiar todos los medidores de cada vivienda por bidireccionales ahorrando costos en instalación de equipos para la conformación de la comunidad energética del barrio.

La integración de esta alternativa se haría directamente en cada grupo de viviendas por la red de baja tensión, con interconexión de los sistemas individuales de cada grupo. Además, se adaptaría un sistema de comunicación para que la información de los inversores se pueda estar recibiendo de manera continua tanto por los usuarios como por el operador de red para llevar a cabo el sistema de cómputo a implementar. Para el sistema de gestión se implementaría un sistema de gestión energética comunitario para realizar el balance entre la producción del sistema fotovoltaico de la comunidad y el consumo de esta. Para la cual se hace necesario implementar un algoritmo de reparto dinámico según producción por grupos y consumo en tiempo real.

Las ventajas de esta alternativa que se pueden apreciar son la mayor resiliencia del sistema ante fallas en la operación de alguno de los inversores, ya que no sacrifica el funcionamiento de toda la comunidad, se aprovechan los espacios disponibles en los techos de las viviendas, puesto

que al hacer la conformación por grupos se analiza el techo con mejores condiciones para la instalación de la mayoría de los paneles del grupo en particular, y la posibilidad de crecer el sistema solar cuando se haga necesario o se den las condiciones para hacerlo. Algunas de las desventajas pueden ser el costo asociado a la inversión inicial, la conformación de los grupos en cuanto a la disponibilidad que se tenga por cada uno de los integrantes para participar activamente en la comunidad y la complejidad de la instalación y el mantenimiento de un sistema de esta clase.

2.2.3. Análisis comparativo técnico-económico de las alternativas propuestas

Con el fin de seleccionar la mejor alternativa de diseño del sistema fotovoltaico comunitario en Tamarindos Club, se desarrolló un análisis comparativo técnico-económico utilizando la plantilla de Excel "Análisis Comparativo de Alternativas", en la cual se evaluarán las tres opciones de diseño, garantizando que la solución elegida sea viable, eficiente y beneficiosa para los residentes.

2.2.3.1. Definición de criterios de evaluación

A fin de realizar un análisis detallado de las tres alternativas para el diseño básico del sistema fotovoltaico en Tamarindos Club, se definieron cinco criterios fundamentales para cada alternativa. Estos criterios se han seleccionado de manera estratégica para garantizar un buen análisis de cada opción

2.2.3.1.1. Aspectos técnicos

Eficiencia energética: La eficiencia energética, implica reducir pérdidas técnicas, mejorar la calidad del suministro y fomentar el uso racional de la energía. También incluye la capacidad

del sistema de adaptarse a las necesidades reales de la comunidad, equilibrando producción y consumo, y promoviendo la sostenibilidad

Confiabilidad: Se define como la capacidad del sistema para suministrar energía de manera continua, segura, estable y sin interrupciones no planificadas, garantizando el funcionamiento adecuado de los equipos eléctricos y la satisfacción de la demanda energética.

2.2.3.1.2. Aspectos económicos

Costo de inversión: Representa el conjunto de recursos económicos necesarios para la adquisición, instalación y puesta en funcionamiento de la infraestructura energética también la forma de distribución del gasto, la escala del proyecto y la posibilidad de participación colectiva o individual.

Retorno de inversión: Es un indicador financiero que permite evaluar la rentabilidad de la inversión a lo largo del tiempo, comparando la ganancia o ahorro generado con respecto al capital invertido inicialmente

Costos operativos y de mantenimiento: Representan los gastos recurrentes necesarios para garantizar el funcionamiento óptimo y continuo de la infraestructura energética, siendo un factor clave para evaluar la sostenibilidad técnica y económica de cada alternativa a lo largo del tiempo.

2.2.3.2. Evaluación: Identificación de Ventajas, Desventajas y Cuantificación

Para cada criterio, se evaluaron las ventajas y desventajas que ofrecía cada alternativa, considerando la naturaleza del criterio. Adicionalmente, se identificaron los equipos necesarios para cada alternativa, lo que permitió su posterior cuantificación en función de las necesidades. (ver Apéndice 1).

2.2.3.2.1. ROI

El análisis de viabilidad económica es fundamental para elegir la alternativa más adecuada en la conformación de nuestra comunidad energética, especialmente dadas las particularidades del mercado energético colombiano y los incentivos normativos actuales. Para evaluar objetivamente las tres opciones propuestas, realizaremos un análisis comparativo detallado que considerará:

Costos de Inversión Inicial (CAPEX): Aquí incluimos la adquisición e instalación de los sistemas fotovoltaicos, la infraestructura de medición inteligente y todos los equipos necesarios para la interconexión.

Costos Operacionales y de Mantenimiento (OPEX): Estos abarcan el mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos, los costos de administración de la comunidad, seguros y los gastos de operación del sistema de gestión energética.

Se calcula el Retorno de Inversión (ROI) mediante el período de recuperación de la inversión (payback), considerando un horizonte de evaluación de 25 años, que corresponde con la vida útil esperada de los sistemas fotovoltaicos. Este análisis tomará como referencia el costo unitario del operador de red para determinar el ahorro energético anual de la comunidad en cada una de las alternativas. Al comparar esta métrica, se puede identificar la opción que optimice la relación costo-beneficio y asegure la sostenibilidad económica a largo plazo de la propuesta de comunidad energética.

Sistema centralizado: Para esta alternativa, la comunidad necesitará un total de 100 paneles solares para cubrir completamente sus necesidades energéticas (ver Apéndice 1, CAPEX Y OPEX Concentrada). Esto implica que la comunidad deberá adquirir o arrendar un terreno donde instalar esta solución centralizada. A diferencia de otras opciones, en este caso es fundamental que

la comunidad se organice y destine recursos de manera conjunta para financiar la totalidad del proyecto fotovoltaico. A continuación, se muestran los resultados clave de este análisis:

Tabla 2

Análisis económico de la alternativa centralizada

Concepto	Valor
Pago anual ESSA	\$ 117.031.500,00
Ahorro anual	\$ 75.034.371,24
CAPEX + OPEX	\$ 633.454.637,96
Retorno de inversión	8 años

Tabla 3. Análisis económico primera alternativa.

Sistema distribuido: Esta alternativa propone una solución fotovoltaica personalizada para cada usuario, buscando satisfacer su autoconsumo basándose en una evaluación individual de su perfil de consumo (ver Apéndice 1, CAPEX Y OPEX Distribuido). Para esta opción, analizamos dos escenarios:

Inversión individual: Aquí, cada usuario asume la totalidad de la inversión para construir su propio sistema fotovoltaico. Es importante señalar que, bajo este esquema, el usuario que solo requiere un panel fotovoltaico es el que más tiempo tardaría en recuperar su inversión. A continuación, se presentan los valores promedio para un usuario individual en este escenario:

Tabla 3

Análisis Económico Promedio por Usuario (Inversión Individual)

Concepto	Valor
Pago anual ESSA	\$ 199.800,00

Ahorro anual	\$ 750.344
CAPEX + OPEX	\$ 13.485.286,88
Retorno de inversión	18 años

Tabla 4. Análisis económico segunda alternativa.

Inversión con Fondos de la Comunidad: En este escenario, la comunidad organiza un fondo de inversión conjunto para financiar las soluciones fotovoltaicas de todos los participantes. Esta estrategia busca una recuperación de la inversión más eficiente a nivel colectivo. A continuación, se muestran los resultados consolidados para la comunidad bajo este modelo de inversión:

Tabla 4

Consolidado Económico de la Comunidad (Inversión con Fondos Comunitarios)

Concepto	Valor	Unidades
Pago anual ESSA	\$ 117.031.500,00	COP
Ahorro anual	\$ 112.551.556,20	COP/Año
CAPEX + OPEX	\$ 1.033.570.290,60	COP/Año
Retorno de inversión	9	Año

Tabla 5. Análisis económico segunda alternativa con fondo comunitario.

Pequeños sistemas distribuidos: En esta alternativa, evaluamos el desempeño de cada grupo de usuarios de forma individual, calculando sus costos de inversión (CAPEX) y costos operativos (OPEX). Los grupos se clasifican según la cantidad de paneles solares que necesitan. Para nuestra comunidad energética, hemos identificado un total de 11 grupos: uno con 5 paneles, seis con 9 paneles, tres con 10 paneles y uno con 12 paneles.

Para calcular el retorno de la inversión, consideramos la energía que genera cada grupo de usuarios y el ahorro energético (ver Apéndice 1, CAPEX Y OPEX Distribuido por grupos). Este ahorro se calcula con un costo unitario promedio de \$900 COP. Además, sumamos el CAPEX y OPEX de todos los grupos, ya que la idea es que la comunidad cree un fondo de inversión para financiar la construcción de todas las soluciones solares individuales. A continuación, se presentan los resultados clave de este análisis:

Tabla 5

Análisis Económico Detallado por Grupos

Concepto	Valor
Pago anual ESSA	\$ 117.031.500,00
Ahorro anual	\$ 75.784.714,95
CAPEX + OPEX	\$ 477.582.213,94
Retorno de inversión	6 años

Tabla 6. Análisis económico tercera alternativa.

Es importante destacar que, además de estos beneficios económicos, la comunidad podría acceder a beneficios tributarios bajo la Ley 1715 para proyectos de generación solar. Esto sería posible si la comunidad decidiera modificar su razón social, una decisión que quedaría a su entera discreción. Considerar este escenario nos permite evaluar la alternativa bajo lo que podríamos llamar la "peor condición" o la situación menos optimista, lo que da robustez a nuestro análisis

Tabla 4

Análisis de las tres alternativas

Centralizada	Distribuido	Grupos
--------------	-------------	--------

Inversión	\$633.454.637,96	\$1.033.570.290,60	\$477.582.213,94
Ahorro anual	\$75.034.371,24	\$112.551.556,20	75.784.714,95
ROI	8 años	9 años	6 años

Tabla 7. Análisis de las tres alternativas.

2.2.3.3. Selección de la alternativa

Tras el análisis técnico-económico de las tres propuestas, considerando un balance entre eficiencia técnica, viabilidad económica, sostenibilidad operativa y beneficios sociales, la Alternativa 3 se identifica como la opción más adecuada para el contexto de Tamarindos Club.

Al agrupar a los usuarios estratégicamente según su ubicación dentro de la comunidad, esta alternativa permite un diseño más eficiente del sistema fotovoltaico, dimensionado específicamente para cubrir necesidades reales y ajustadas a la demanda energética, con perfil de consumo específico, de cada grupo. Además, esta estrategia permite implementar el sistema por fases, agrupando progresivamente a los usuarios registrados, esto representa una gran ventaja financiera, ya que no se requiere una inversión total inmediata, sino que se puede avanzar según disponibilidad de recursos y financiamiento.

El costo por usuario se reduce al compartir equipos e infraestructura dentro de cada grupo, permitiendo que incluso hogares de menor capacidad adquisitiva puedan acceder a los beneficios del sistema solar. Igualmente, al organizarse en grupos, los usuarios desarrollan una dinámica colaborativa para gestionar, mantener y controlar el sistema, lo cual refuerza los lazos sociales, la corresponsabilidad energética y el sentido de pertenencia. La estructura distribuida por grupos facilita el mantenimiento preventivo y correctivo.

2.2.4. Ingeniería Básica del Sistema Fotovoltaico

La ingeniería básica del sistema fotovoltaico seleccionado para presentar en el documento es para el grupo de 4 casas en Tamarindos Club, que incluye la instalación de 8 paneles de 600 Wp, se desarrolló utilizando el software PVSOL. A continuación, se presentan los componentes clave: dimensionamiento del sistema, esquema unifilar, listado de equipos principales y estimación de generación energética (ver Apéndice 5).

2.2.4.1. Dimensionamiento fotovoltaico

El sistema está diseñado para aprovechar la radiación solar de Barrancabermeja, con una capacidad total de 4.8 kWp (8 paneles x 600 Wp). La configuración incluye superficies fotovoltaicas distribuidas en un arreglo de 1 x 2 y 1 x 4, conectadas mediante cableado adecuado. El software PVSOL optimizó el diseño considerando las condiciones locales de radiación y consumo.

2.2.4.2. Esquema unifilar

El esquema unifilar ilustra la conexión del sistema fotovoltaico al punto de consumo y la red de CA. Se muestra una disposición con dos inversores en paralelo, conectados a una superficie fotovoltaica principal mediante cables de 2.5 mm² de cobre. La distancia total entre componentes y la red es de 10 metros, con una tensión de 220 V y un factor de potencia de 1.

En la figura se puede observar el esquema unifilar del sistema fotovoltaico con 8 paneles de 600 Wp, generado por PVSOL, mostrando la conexión de las superficies fotovoltaicas (1 x 2 y 1 x 4), inversores, cableado y punto de consumo 6,670 kWh con inyección a la red de 220 V.

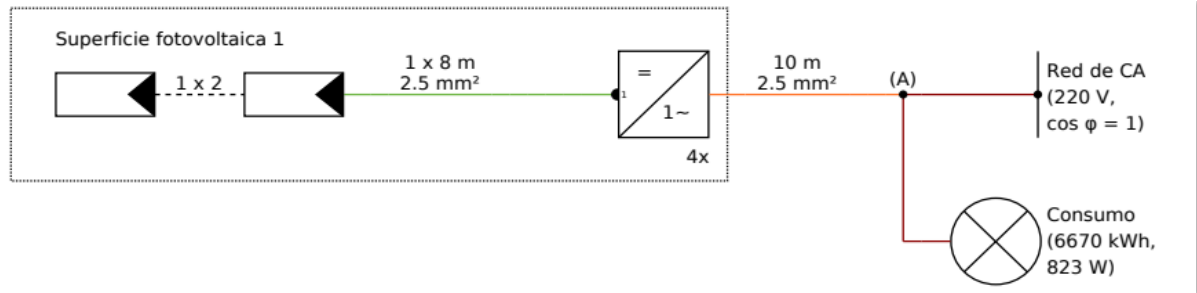


Figura 2. Esquema unifilar.

2.2.4.3. Listado de equipos principales

La lista de materiales detalla los componentes necesarios para la instalación, fabricados principalmente por Trina Solar y GROWATT New Energy Co., Ltd. Se incluyen 8 módulos fotovoltaicos, 4 inversores y 32 metros de cable de cobre de 2.5 mm². En la siguiente tabla se puede observar el listado de equipos principales para el sistema de 8 paneles de 600 W_p, basado en los datos generados por PVSOL.

Tabla 6

Listado de equipos

Numero de posición	Tipo	Fabricante	Nombre	Cantidad	Unidad
1	Modulo fotovoltaico	Trina solar	TSM-600-NEG19RC.20 VERTEX N 2023-B	8	Pieza
2	Inversores	GROWATT New Energy Co,Ltd.	MIC 1500 TL-X	4	Pieza
3	Cable		Cables de CA 1-fasico 2.5mm2 Cobre	40	m
4	Cable		Cond. De línea 2.5 mm2 Cobre	32	m

Tabla 8. Equipos.

2.2.4.5. Estimación de generación eléctrica

La estimación de generación energética, calculada con PVSOL, indica una producción anual de 7,839 kWh/año, con un rendimiento específico de 1,631.00 kWh/kWp y un coeficiente de rendimiento del 87.1%. El gráfico de utilización muestra la distribución mensual de la energía generada, el consumo propio directo (8,337 kWh) y la inyección a la red.

Tabla 7

Estimación de generación fotovoltaica

Calidad técnica de la instalación fotovoltaica	
Energía de generador FV (Red CA)	7,839 kWh/Año
Rendimiento anual espec.	1,361.00 kWh/kWp
Coeficiente de rendimiento de la instalación (PR)	87.1%

Tabla 9. Estimación de generación fotovoltaica.

2.2.5. Modelo de gestión de gestión energética comunitaria

Se desarrolló un modelo de gestión energética comunitaria para Tamarindos Club que abarca los esquemas de medición y facturación, los protocolos de operación y mantenimiento, los roles y responsabilidades de los participantes, y los mecanismos para distribuir beneficios de manera equitativa. Diseñado para 11 grupos, donde cada grupo cuenta con diseño de 4, 8,9 y 11 paneles de 600 Wp, este modelo opera como un sistema interno que redistribuye excedentes usando un medidor bidireccional en el transformador, la información que suministra los micro-inversores y los medidores convencionales existentes en las casas. Ver aprendice #4.

3. Conclusiones

El diseño conceptual del sistema fotovoltaico para la comunidad energética Tamarindos Club en Barrancabermeja marca un paso significativo hacia la sostenibilidad energética en Colombia. Este proyecto, fundamentado en un análisis técnico-económico de tres alternativas, responde a las necesidades de los residentes mientras se alinea con las metas de transición energética del país, establecidas en el Decreto 2236 de 2023. La tercera alternativa, basada en pequeños sistemas distribuidos, optimiza la radiación solar de la región, que promedia entre 5.0 y 5.5 kWh/m²/día según el IDEAM, generando 7,839 kWh/año por grupo con un rendimiento específico de 1,631 kWh/kWp. Esta solución no solo reduce la dependencia de la red eléctrica, sino que también disminuye las emisiones de carbono, contribuyendo a los objetivos nacionales de descarbonización y a la mitigación del cambio climático a nivel global. La comunidad de Tamarindos Club se convierte así en un modelo práctico de cómo la tecnología solar puede transformar entornos urbanos en espacios sostenibles.

Desde el punto de vista económico, la tercera alternativa destaca por su retorno de inversión de seis años, con ahorros anuales de \$75,784,714.95 y un costo total de \$477.582.213,94, superando a las otras opciones que requerían ocho y nueve años para la recuperación. Al organizar a los usuarios en 11 grupos de 2 a 6 viviendas, esta solución reduce los costos por hogar, haciendo la tecnología accesible incluso para familias con menos recursos. La implementación por fases permite una inversión progresiva, facilitando la financiación y promoviendo la inclusión, en línea con los incentivos de la Ley 1715 de 2014. Este enfoque no solo asegura viabilidad económica, sino que también maximiza los beneficios para todos los residentes, permitiéndoles destinar ahorros a otras necesidades esenciales y mejorando su calidad de vida.

El impacto de este proyecto trasciende lo técnico y económico, fortaleciendo los lazos comunitarios a través de un modelo de gestión energética participativo. El comité energético, con un representante por cada diez viviendas, y el fondo comunitario, que destina el 20% de los ahorros al mantenimiento y expansión del sistema, empoderan a los residentes al involucrarlos en la toma de decisiones. Esta dinámica fomenta la corresponsabilidad y el sentido de pertenencia, transformando a los habitantes en agentes activos de su propio desarrollo energético. Las capacitaciones trimestrales propuestas aseguran que los residentes adquieran conocimientos para operar y mantener el sistema, garantizando su sostenibilidad a largo plazo, promoviendo una cultura de responsabilidad ambiental y de la empresa comunitaria.

Este proyecto también se destaca por su potencial de replicabilidad en otras comunidades urbanas de Colombia, especialmente en regiones con condiciones solares similares, como Santander. Cumpliendo con normativas como el RETIE 2024 y el Decreto 2236 de 2023, el diseño ofrece un marco escalable que puede adaptarse a diversos contextos, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética nacional y al objetivo del Plan Nacional de Energía Renovable de alcanzar un 10% de energía renovable para 2030. La integración de tecnologías como sistemas de monitoreo en tiempo real y algoritmos de reparto dinámico posiciona a Tamarindos Club como un referente para futuras comunidades energéticas, demostrando que la innovación tecnológica puede ir de la mano con el desarrollo social.

Este trabajo refleja un compromiso profundo con el bienestar de los residentes de Tamarindos Club y con el futuro sostenible de Colombia. Al reducir los costos energéticos de la comunidad, que alcanzan hasta \$117,031,500 anuales en pagos a la Electricadora de Santander, los hogares pueden mejorar su economía familiar y calidad de vida. Más allá de los números, este

proyecto siembra una semilla de cambio cultural hacia la sostenibilidad, fomentando la educación ambiental y la colaboración comunitaria.

4. Recomendaciones

Es fundamental realizar un estudio de factibilidad económica detallado que explore opciones de financiación accesibles, como los fondos públicos contemplados en el Decreto 2236 de 2023. Estos recursos, junto con los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014, como exenciones de IVA y aranceles, pueden reducir significativamente las barreras de inversión inicial para los residentes. Este análisis debe incluir un plan de financiamiento escalonado que permita a los hogares de menores ingresos participar activamente, garantizando la inclusión y equidad en la comunidad energética. Al estructurar estas opciones, se fortalecerá la viabilidad económica del proyecto, asegurando que los ahorros proyectados de \$75,784,714.95 anuales se traduzcan en beneficios tangibles para todos los habitantes de Tamarindos Club.

Se recomienda integrar un sistema de almacenamiento de energía, como baterías de litio, para optimizar el uso de los 7,839 kWh/años generados por cada grupo, según estimaciones de PVSOL. Este sistema permitiría almacenar excedentes energéticos producidos durante las horas de mayor radiación solar (9 a.m. a 3 p.m.) para su uso en períodos de baja generación o durante interrupciones de la red eléctrica. Esta medida no solo incrementaría la resiliencia del sistema, sino que también maximizaría el autoconsumo directo, actualmente estimado en 8,337 kWh, reduciendo aún más la dependencia de la Electrificadora de Santander y fortaleciendo la autonomía energética de la comunidad.

Implementar un programa de capacitación continua para los residentes es esencial para garantizar la sostenibilidad operativa del sistema fotovoltaico. Estas capacitaciones, recomendadas

con periodicidad trimestral, deben abarcar la lectura de medidores, el uso de plataformas de monitoreo en tiempo real, la limpieza segura de paneles solares y la respuesta ante emergencias. Este esfuerzo educativo no solo empoderará a los habitantes, fomentando su participación en la gestión de la comunidad energética, sino que también reducirá los costos de mantenimiento al minimizar la dependencia de técnicos externos. Al promover una cultura de responsabilidad y conocimiento, se asegurará que el sistema perdure en el tiempo, manteniendo su eficiencia y beneficios.

Se recomienda documentar y difundir los resultados de este proyecto como un caso de estudio para otras comunidades en Colombia y más allá. La experiencia de Tamarindos Club, alineada con normativas como el RETIE 2024 y el objetivo del Plan Nacional de Energía Renovable de alcanzar un 10% de energía renovable para 2030, puede inspirar iniciativas similares en contextos urbanos con condiciones solares comparables. Compartir lecciones aprendidas, desafíos superados y estrategias exitosas a través de publicaciones académicas o foros especializados posicionará este trabajo como un referente en la transición energética justa. Con estas acciones, el proyecto no solo cumple con los estándares para optar al título de Ingenieros Electricistas, sino que también deja un legado de innovación, inclusión y compromiso con un futuro sostenible para Colombia.

Referencias Bibliográficas

- Colombia. Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2021). Resolución CREG 174 de 2021: Por la cual se establecen las condiciones para la entrega de excedentes de energía al Sistema Interconectado Nacional por parte de auto-generadores y generadores distribuidos. Bogotá: CREG.
- Colombia. Congreso de la República. (2014). Ley 1715 de 2014: Por medio de la cual se regula la integración de las fuentes no convencionales de energía renovable al Sistema Interconectado Nacional y a las zonas no interconectadas y se dictan otras disposiciones. Bogotá: Diario Oficial.
- Colombia. Ministerio de Minas y Energía. (2023). Decreto 2236 de 2023: Por el cual se adiciona al Decreto 1073 de 2015 y se regula parcialmente el artículo 235 de la Ley 2294 de 2023 del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 en lo concerniente a las comunidades energéticas en el contexto de la transición energética justa. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- Colombia. Ministerio de Minas y Energía. (2024). Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE 2024). Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2017). IEEE Std 2030.7-2017: Standard for the specification of microgrid controllers. New York, NY: IEEE.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (s.f.). Atlas de radiación solar de Colombia. Bogotá: IDEAM.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (s.f.). Proyecciones de energía renovable 2030. Bogotá: UPME

Valentin Software. (2025). PVSOL: Software de diseño fotovoltaico (Versión 2025) [Programa de computadora]. Berlín, Alemania: Valentin Software.

Apéndices

Apéndice 1. Analisis de alternativas

- Dimensionamiento de alternativas
 - Concentrada
 - Grupos
 - Individuales
- ROI
 - CAPEX Y OPEX (Distribuido por grupos)
 - CAPEX Y OPEX Concentrada
 - CAPEX Y OPEX Distribuido
- Cuadro comparativo de alternativas
- Información de consumo de Tamarindos
- Resultados de cada alternativa
- Simulación de grupos dentro de la comunidad

Apéndice 2. Fichas técnicas

- 1. Panel de 600Wp
- 2. Microinversor 1500 W
- 3. 3Microinversor 1500-3000 tl-x
- 4. Monitotización ecu-c

Apéndice 3. Google earth

- Ubicación de las viviendas en google earth

Apéndice 4. Modelo de gestión energética

- Modelo de gestión energética comunitaria

Apéndice 5. Simulación para grupos dentro de la comunidad

- 4 paneles
- 8 paneles
- 9 paneles
- 11 paneles

Enlace para acceder a los anexos: https://drive.google.com/drive/folders/1EmBvgLa5d-MM72xyiAVIcxz6_Z2nddSI?usp=sharing