



**UNIVERSIDAD EAN**

**ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICO - ECONÓMICA DE LA  
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRAL DE TECNOLOGÍAS LIMPIAS  
PARA EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO EN LA FINCA EL BOQUERÓN**

**LINA GABRIELA PARDO GARAY  
JUAN ESTEBAN VERGARA RIVERA  
HÉCTOR JOSÉ ÁLVAREZ BARRERA**

**BOGOTÁ D.C**



## Resumen Ejecutivo

Diseñar una propuesta integral de tecnologías limpias para satisfacer la demanda energética de la finca El Boquerón, mediante la implementación de una simulación y el diagnóstico del impacto ambiental, aprovechando la disponibilidad de recursos locales y utilizando un sistema energético sostenible, eficiente y respetuoso con el medio ambiente para beneficio de la comunidad.



## Introducción

El desarrollo sostenible se ha convertido en una meta esencial a nivel mundial debido a los crecientes retos energéticos y ambientales que enfrentan muchas comunidades, especialmente aquellas ubicadas en áreas rurales y de difícil acceso. En este contexto, La finca El Boquerón representa un claro ejemplo de las complicaciones asociadas con el suministro de energía en zonas con poca infraestructura y una fuerte dependencia de fuentes tradicionales. La falta de acceso confiable a la energía no solo genera inestabilidad en el servicio y altos costos, sino que también afecta de manera negativa áreas clave como la educación, la salud, la economía y, en general, la calidad de vida de sus habitantes.

En numerosas zonas rurales, el uso de combustibles fósiles y sistemas energéticos ineficientes afecta directamente la liberación de gases de efecto invernadero, intensificando el deterioro del medio ambiente y el cambio climático. Además, la ausencia de redes eléctricas adecuadas aumenta la vulnerabilidad de estas comunidades a cortes de energía y cambios en la disponibilidad del suministro. En vista de esta situación, es urgente avanzar hacia un modelo de energía que se base en fuentes renovables y sostenibles para alcanzar un desarrollo justo y duradero.

El objetivo de este proyecto es abordar esta problemática mediante la puesta en marcha de un sistema integral de tecnologías limpias que asegure el acceso a una energía segura, económica y sostenible en el corregimiento de El Boquerón. La propuesta incluye el diseño de una solución técnico-económica que se base en el aprovechamiento de energías renovables, como la solar y la eólica, con el objetivo de ofrecer una alternativa viable adaptada a las características del lugar. Esta transición facilitará la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, mejorará la eficiencia energética y contribuirá al bienestar de la comunidad,



al mismo tiempo que se cuida el entorno natural.

Para ello, se llevará a cabo un análisis detallado de las necesidades energéticas del corregimiento, identificando tanto las limitaciones actuales como las oportunidades de mejora. Mediante el uso de herramientas de simulación, se examinará la viabilidad técnica y económica de las tecnologías limpias propuestas, estableciendo los recursos necesarios y la mejor manera de distribuir los sistemas energéticos dentro de la comunidad.

Uno de los principales beneficios de esta estrategia es la posibilidad de alcanzar autonomía energética en la región, disminuyendo la dependencia de fuentes externas y garantizando un suministro continuo y confiable. De igual manera, la adopción de energías renovables ayudará a reducir las emisiones contaminantes, siguiendo los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) promovidos por la Organización de las Naciones Unidas, especialmente el ODS 7, que se enfoca en asegurar el acceso universal a una energía económica y limpia.

Además, implementar un sistema energético que sea sostenible tendrá un efecto favorable en la economía local y en la generación de empleo. La instalación, operación y mantenimiento de estas tecnologías exigirá capacitación para el personal de la comunidad, lo que creará oportunidades laborales y fortalecerá las habilidades técnicas. Este proceso, a su vez, ayudará a mejorar la calidad de vida de los residentes y a establecer un modelo de desarrollo autosuficiente y sostenible.

El proyecto también tiene la intención de convertirse en una referencia que pueda ser replicada en otras comunidades que enfrenten dificultades similares. La experiencia adquirida en El Boquerón podría servir como modelo para llevar a cabo soluciones energéticas sostenibles en varias áreas rurales del país, ampliando así su alcance y el impacto positivo de esta propuesta.

En resumen, la propuesta técnico-económica presentada no solo tiene como objetivo



satisfacer una necesidad urgente de suministro energético, sino que también sienta las bases para un cambio estructural hacia un modelo de energía limpia y sostenible. Con esto, se busca mejorar las condiciones de vida en El Boquerón, disminuir el impacto ambiental y fomentar un uso responsable de los recursos naturales en la región. Esta iniciativa se alinea con los principios de sostenibilidad y eficiencia energética, reafirmando que el acceso a la energía debe considerarse un derecho fundamental y una herramienta clave para el desarrollo integral de las comunidades.



### **Objetivo General**

Diseñar una propuesta técnico-económica para la implementación de energías renovables, mediante simulación, como estrategia para el abastecimiento de la demanda energética en el corregimiento de El Boquerón.

### **Objetivos Específicos**

- Realizar un diagnóstico que permita identificar las necesidades energéticas de la comunidad.

Desarrollar simulaciones que faciliten la visualización de la distribución en las áreas y la cantidad de implementaciones tecnológicas necesarias para la comunidad.

Evaluar la viabilidad técnico-económica del proyecto, con el fin de que posteriormente pueda ser presentado.



## Definición del Problema

El corregimiento de El Boquerón enfrenta un creciente desafío para satisfacer su demanda energética, impulsada tanto por el aumento progresivo de la población como por la intensificación de actividades económicas y sociales. La infraestructura energética actual, que se basa principalmente en fuentes no renovables, se muestra insuficiente y obsoleta para abastecer de forma continua y segura a esta comunidad. Uno de los problemas más apremiantes es el acceso irregular o inexistente a la energía eléctrica que enfrentan diversos sectores del corregimiento, situación que se ve agravada por el mal estado de las vías de acceso, la dispersión geográfica de la población y la escasa atención institucional que estas zonas suelen recibir. La falta de caminos adecuados y de medios de comunicación eficientes no solo dificulta la instalación de infraestructura, sino también la atención oportuna ante fallas y la planificación de soluciones sostenibles.

Esta situación genera una dependencia vulnerable de sistemas energéticos centralizados y poco resilientes, lo que repercute negativamente en la calidad de vida de los habitantes y limita el desarrollo local. En muchas ocasiones, las familias deben recurrir a fuentes contaminantes y costosas, como generadores a diésel, lo que incrementa el impacto ambiental y los gastos económicos. Además, la comunidad ha comenzado a mostrar una mayor conciencia sobre la necesidad de transitar hacia modelos energéticos más sostenibles y menos agresivos con el entorno natural.

Por ende, el sistema actual no solo es ineficiente para cubrir la demanda energética actual y futura, sino que también desaprovecha los recursos naturales locales que podrían ser utilizados mediante tecnologías limpias. El potencial solar, el acceso a biomasa agrícola, los recursos hídricos disponibles y las condiciones climáticas aptas para la generación eólica representan



oportunidades viables que deben ser exploradas. En este sentido, el proyecto debe enfocarse en la identificación, análisis e implementación de soluciones tecnológicas limpias adaptadas a las condiciones de El Boquerón. Es indispensable evaluar la viabilidad técnica, económica, social y ambiental de cada alternativa, asegurando que las propuestas sean accesibles, escalables y sostenibles en el tiempo. El objetivo es proporcionar un suministro energético confiable, eficiente y respetuoso con el entorno, promoviendo al mismo tiempo el desarrollo integral de la comunidad y su autosuficiencia energética.



## Justificación

La finca de El Boquerón enfrenta serios desafíos en el acceso a un suministro energético estable y seguro. La dependencia de fuentes convencionales, como los combustibles fósiles, no solo genera altos costos económicos, sino que también impacta negativamente el medio ambiente y contribuye al cambio climático. Además, la intermitencia en el suministro energético limita el desarrollo económico y social de la comunidad, afectando su calidad de vida.

Se propone una solución sostenible mediante la incorporación de tecnologías energéticas limpias. A través del diseño de sistemas basados en energías renovables, como paneles solares, biomasa, turbinas eólicas y sistemas de almacenamiento de energía, se busca garantizar un abastecimiento confiable, eficiente y ambientalmente responsable.

La implementación de estas tecnologías no solo permitirá reducir la huella de carbono del corregimiento, sino que también impulsará el desarrollo local mediante la generación de empleo en la instalación, operación y mantenimiento de estos sistemas. Además, fomentará la autonomía energética de la comunidad, reduciendo su dependencia de fuentes externas y promoviendo un modelo de desarrollo resiliente y sustentable.

Otro aspecto clave de este proyecto es que va ligado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, especialmente con el ODS 7, que busca garantizar el acceso universal a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. La transición hacia un modelo energético basado en fuentes renovables permitirá a El Boquerón mejorar su calidad de vida y convertirse en un referente regional en el uso responsable de los recursos energéticos.

En conclusión, este proyecto representa un plan clave para transformar el abastecimiento energético en el corregimiento de El Boquerón, a través de un diseño técnico y económico balanceado, que busca garantizar un sistema energético sostenible que beneficie a la comunidad,



fortalezca su desarrollo y proteja su entorno natural para las generaciones futuras.

## Análisis de Requerimientos

### Requerimientos no Funcionales

Los requisitos funcionales establecen las funciones específicas que el sistema debe realizar para atender las demandas energéticas del corregimiento:

**Evaluación energética actual:** Es vital llevar a cabo un análisis exhaustivo de la situación energética de la localidad, abarcando las fuentes de energía usadas, los hábitos de consumo, el acceso y la calidad del servicio. Este paso permitirá detectar las deficiencias importantes en el suministro actual.

**Identificación de fuentes renovables adecuadas:** El estudio técnico debe contemplar una evaluación de los recursos naturales presentes, como la radiación solar, la velocidad del viento o la disponibilidad de biomasa, para determinar el potencial de generación local. Esta información será fundamental para elegir las tecnologías adecuadas.

**Diseño de un sistema energético integral:** La propuesta de sistema debe combinar diferentes tecnologías limpias, seleccionadas según su viabilidad técnica, climática y territorial, y que sean coherentes con las características socioeconómicas de la comunidad.

**Cálculo de la capacidad de generación necesaria:** Es fundamental estimar la demanda de energía de la comunidad (residencial, comercial, institucional y productiva) para dimensionar de manera adecuada la capacidad de generación, almacenamiento y distribución.

**Análisis de impactos técnicos y medioambientales:** Se debe evaluar la viabilidad técnica de la propuesta y su efecto en el entorno natural y en la calidad de vida de los residentes. Este examen ayudará a prevenir posibles efectos negativos.

- **Comparación de opciones:** Se sugiere crear al menos dos escenarios: uno que mantenga



el sistema actual y otro que incorpore el sistema limpio, para poder determinar los beneficios comparativos en aspectos de sostenibilidad, costos y resiliencia.

- **Establecimiento de estrategias de operación y mantenimiento:** Con el fin de asegurar la sostenibilidad del sistema, se deben elaborar protocolos claros para su operación, mantenimiento preventivo y correctivo, así como métodos de formación para los operadores locales.

#### Requerimientos del Sistema

- **Enfoque ecológico y bajo impacto:** Todas las tecnologías implementadas deben enfocarse en reducir la huella ambiental y limitar la dependencia de fuentes contaminantes.
- **Capacidad de crecimiento del sistema:** El diseño tiene que contemplar la expansión del sistema ante el aumento de la población o el crecimiento de las actividades productivas, sin poner en riesgo su eficacia.
- **Ajuste sociocultural:** Es crucial que las soluciones energéticas se integren de manera adecuada en las dinámicas sociales, tradiciones y principios de la comunidad, evitando imposiciones tecnológicas.
- **Fiabilidad y continuidad en el suministro:** El sistema debe funcionar de manera constante ante distintas condiciones, asegurando un suministro de energía continuo y fiable.
- **Adherencia a la normativa:** Es necesario cumplir con las leyes, regulaciones y políticas existentes en el ámbito energético y ambiental, tanto a nivel nacional como local, para asegurar la legalidad y la factibilidad del proyecto.

**Necesidades**

**del**

**Usuario**

La efectividad del proyecto está fuertemente ligada a cómo lo acepte y lo haga suyo la comunidad



beneficiada. En este contexto, se identifican los siguientes requerimientos concretos de los usuarios:

- **Acceso continuo y seguro a la energía:** La solución debe asegurar un suministro adecuado y fiable de energía para satisfacer necesidades fundamentales (iluminación, refrigeración, cocción, conectividad) y actividades productivas (microempresas, agricultura, educación).
- **Costo accesible:** Es esencial que los gastos relacionados con la instalación, funcionamiento y mantenimiento del sistema sean razonables y coherentes con la capacidad económica de los usuarios.
- **Formación para la comunidad:** Es necesario incluir un componente educativo que permita a la población entender cómo opera el sistema, promover su cuidado y fortalecer las habilidades locales para su administración.
- **Involucramiento de actores locales:** La participación de organizaciones comunitarias, autoridades locales y líderes sociales en las distintas etapas del proyecto ayudará a cultivar un sentido de pertenencia y garantizar la sostenibilidad del sistema.

### Requerimientos del Sistema

Por último, es necesario considerar requisitos técnicos y de planificación que garanticen una ejecución exitosa del proyecto:

- **Acceso a información básica:** El proyecto demanda datos precisos acerca del clima, la geografía, el uso del suelo y las condiciones socioeconómicas del área para fundamentar las elecciones de diseño.
- **Análisis de viabilidad técnica:** Es crucial llevar a cabo un estudio minucioso del funcionamiento de cada tecnología limpia sugerida, teniendo en cuenta factores como eficiencia, gastos, mantenimiento y su adecuación al entorno local.



- **Plan económico y financiero:** El diseño debe incluir estimaciones claras sobre la inversión inicial, el retorno esperado, los costos operativos, la duración del sistema y las fuentes de financiación. Esto permitirá examinar la viabilidad económica del proyecto.
- **Uso de infraestructura existente:** Siempre que sea posible, se debe considerar la fusión del nuevo sistema con las instalaciones energéticas actuales, a fin de disminuir costos y facilitar su implementación.



## Marco Teórico

Para analizar la viabilidad técnica y económica de la implementación de un sistema integral de tecnologías limpias para el abastecimiento energético en el corregimiento de Boquerón, es fundamental examinar diferentes aspectos. Este marco teórico estudia el uso de energías convencionales, los desafíos en las zonas rurales, los impactos ambientales y sociales de la transición energética, y las posibles soluciones que ofrecen las tecnologías limpias.

### **Energías Convencionales y sus Desafíos**

Las fuentes de energía convencionales, como los combustibles fósiles, han sido la base del suministro energético mundial durante décadas. Sin embargo, su uso trae consigo diversos problemas. Uno de los principales es la escasez progresiva de estos recursos, ya que su extracción y consumo acelerado han reducido considerablemente las reservas disponibles (IEA, 2022). Además, la combustión de estos combustibles libera grandes cantidades de gases de efecto invernadero, lo que contribuye al cambio climático y a la degradación ambiental (IPCC, 2021).

Otra limitación de las energías convencionales es su falta de sostenibilidad y estabilidad a largo plazo. La dependencia de fuentes no diversificadas puede llevar a crisis energéticas cuando los precios del petróleo y el gas fluctúan, afectando la economía global y local (REN21, 2022). Además, los riesgos asociados con su extracción, transporte y almacenamiento, como derrames de petróleo o explosiones en refinerías, representan serias amenazas para la salud humana y el medio ambiente (Gómez, 2024).

### **Barreras para el Acceso a la Energía en Zonas Rurales**

Las comunidades rurales enfrentan numerosos obstáculos para acceder a fuentes de energía confiables y asequibles. Factores como la dispersión geográfica y la baja densidad de



población elevan los costos de infraestructura, dificultando la expansión de redes eléctricas en estas áreas (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2020; Valencia, 2019). Adicionalmente, el tipo de terreno puede representar un reto importante para la instalación y mantenimiento de líneas de transmisión (Ostau de Lafont, 2009).

El acceso limitado a financiamiento es otro obstáculo que frena el desarrollo energético en zonas rurales. A pesar de que existen programas gubernamentales e internacionales que buscan cerrar esta brecha, como "Luz para Todos" en Brasil, la inversión sigue siendo insuficiente en muchas regiones (Gómez, 2021). Además, la falta de información y capacitación en tecnologías limpias hace que muchas comunidades no puedan aprovechar estas soluciones de manera efectiva.

### **Impactos Ambientales de las Tecnologías Limpias**

La transición hacia fuentes de energía renovables representa una oportunidad significativa para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y mitigar el impacto del cambio climático (Hernández, 2022). Las tecnologías limpias no solo permiten una generación de energía más sostenible, sino que también optimizan el uso de los recursos naturales, como el agua, en comparación con las centrales térmicas tradicionales (Energy Solución Solar, 2023).

Asimismo, la implementación de energías renovables ayuda a proteger la biodiversidad y a reducir la deforestación al disminuir la dependencia de la biomasa como fuente energética (Hilcu, 2023; Vásquez & Gamio, 2018). También mejora la calidad del aire, reduciendo la cantidad de partículas contaminantes que afectan la salud de las personas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, s.f.). Sin embargo, es fundamental analizar el impacto ecológico de la fabricación y desecho de tecnologías como paneles solares y turbinas eólicas, así como el efecto de grandes hidroeléctricas en los ecosistemas acuáticos.



## **Impactos Sociales y Económicos**

La implementación de energías renovables genera beneficios sociales y económicos significativos. Entre ellos, la creación de empleo local en la instalación, operación y mantenimiento de infraestructuras energéticas (Lestresol, 2023). El acceso a energía confiable en zonas rurales mejora la calidad de vida, impulsando el desarrollo educativo y productivo (Villán, 2024). También fomenta la inclusión social, ya que muchos de estos proyectos requieren la participación activa de las comunidades (Banco Mundial, 2021).

Por otro lado, la disponibilidad de energía limpia fortalece la infraestructura sanitaria y educativa, garantizando un suministro eléctrico constante para hospitales y escuelas (Celco, 2023). Además, la electrificación de comunidades remotas está vinculada con la reducción de la pobreza y el crecimiento económico local (Banco Mundial, 2024). A pesar de estos beneficios, algunos desafíos persisten, como la resistencia cultural a nuevas tecnologías y la necesidad de capacitación técnica para el mantenimiento de los sistemas renovables.

## **Tecnologías Limpias como Solución Sostenible**

Las energías renovables, como la solar fotovoltaica, la eólica, la biomasa y el biogás, representan una solución viable para las comunidades rurales. Los sistemas fotovoltaicos permiten generar energía de manera descentralizada, mientras que la energía eólica puede complementar el suministro en regiones con vientos favorables (Solar360, 2023; Enel, 2022). La biomasa y el biogás aprovechan residuos orgánicos, promoviendo economías circulares y reduciendo la contaminación (Interempresas, 2024; Naturgas, 2024). Finalmente, las pequeñas centrales hidroeléctricas contribuyen a reducir las emisiones sin los impactos negativos de grandes represas (Sanabria, 2024).

A medida que avanza la investigación y el desarrollo de tecnologías de almacenamiento



energético, como baterías de ion-litio y sistemas híbridos, la eficiencia de estas soluciones seguirá mejorando, facilitando la transición hacia una matriz energética más sostenible.

### **Tipos de Paneles Solares**

Existen principalmente dos tipos de paneles solares: monocristalinos y policristalinos. La diferencia fundamental entre ellos radica en su composición, eficiencia y apariencia. Los paneles monocristalinos, fabricados a partir de un solo cristal de silicio, presentan un color negro uniforme y ofrecen una eficiencia de conversión de hasta un 22%. Por su parte, los paneles policristalinos, compuestos por múltiples fragmentos de silicio, poseen un tono azulado característico y una eficiencia promedio del 16% (Alonso, 2024). Dado el espacio limitado disponible en este proyecto, la elección de paneles monocristalinos es la más adecuada, ya que su mayor eficiencia permite optimizar la generación de energía en áreas reducidas, mejorando así el rendimiento general del sistema.

### **Seguridad Energética**

La seguridad energética es esencial para el desarrollo de las sociedades, pues no es solo un producto básico, sino una condición previa para el acceso a otros recursos fundamentales, como el agua, los alimentos o la salud. Según Schumacher (1977, citado por Sovacool & Mukherjee, 2011), disponer de recursos energéticos estables es vital para garantizar el bienestar y el progreso de una comunidad o país. Una infraestructura energética segura impulsa sectores clave como el industrial, agrícola, educativo y sanitario, permitiendo un desarrollo integral.

### **Matriz Energética**

La matriz energética de un país constituye una representación del conjunto de fuentes energéticas utilizadas para satisfacer la demanda interna. Contar con una matriz diversificada implica mayor seguridad energética y resiliencia ante crisis o fluctuaciones de precios. En



contextos rurales, la implementación de tecnologías limpias contribuye a fortalecer la diversidad energética, reduciendo la dependencia de fuentes fósiles y garantizando un suministro más estable.

### **Energías Renovables**

**Energía Eólica:** Esta fuente renovable utiliza la energía cinética del viento para generar electricidad mediante aerogeneradores. Es una tecnología limpia, abundante y con bajo impacto ambiental (Blanco, 2024).

**Energía Solar:** Capturada a través de paneles fotovoltaicos, convierte la radiación solar en electricidad. Es una de las tecnologías renovables más utilizadas a nivel mundial y clave en la transición hacia una matriz energética sostenible (Factor Energía, 2023).

**Energía Geotérmica:** Aprovecha el calor interno de la Tierra para producir electricidad o calefacción. Su eficacia es mayor en zonas de alta actividad geológica, y representa una fuente constante y sostenible (Endesa, 2021).

**Energía Hidráulica:** Utiliza la fuerza del agua en movimiento, ya sea en presas o ríos, para accionar turbinas generadoras de electricidad. Es una de las fuentes más eficientes a gran escala (Enel, 2022).

**Energía Nuclear:** Aunque no es considerada renovable, destaca por su baja emisión de gases de efecto invernadero y su alta densidad energética. No obstante, presenta desafíos relacionados con el manejo de residuos radiactivos (AIEA, 2024).

**Biomasa:** Consiste en aprovechar residuos orgánicos (agrícolas, forestales o urbanos) para generar electricidad, calor o biocombustibles, contribuyendo a la economía circular y la reducción de residuos (BBVA, 2024).

### **Sistema Interconectado Nacional (SIN)**



El Sistema Interconectado Nacional (SIN) es la red eléctrica que conecta las principales plantas generadoras con los centros de consumo del país, garantizando un suministro eficiente a nivel nacional. Este sistema permite integrar diferentes fuentes de generación, incluida la energía renovable (El Tiempo, 2023).

### **Software de Dimensionamiento**

Para el diseño y evaluación de proyectos energéticos se utilizan herramientas como HOMER y PVsyst. HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) es ideal para analizar sistemas híbridos, evaluando la viabilidad técnica y económica de configuraciones que integren diversas fuentes (solar, eólica, diésel, etc.). Por otro lado, PVsyst es un software especializado en el diseño y simulación de sistemas fotovoltaicos, utilizado para estimar el rendimiento energético considerando factores locales como la irradiación solar o la orientación de los paneles (PVsyst, s.f.).

### **Equipos, Sistemas y Conexiones**

Un sistema de energía renovable se compone de los siguientes elementos principales:

**Turbinas eólicas:** Capturan la energía del viento para generar electricidad (Blanco, 2024; Enel, 2022).

**Paneles solares fotovoltaicos:** Transforman la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico (Factor Energía, 2023; Lestresol, 2023).

**Inversores:** Convierte la corriente continua (CC) generada por los paneles en corriente alterna (CA), adecuada para el consumo y distribución (Celco, 2023).

**Sistemas de almacenamiento (baterías):** Permiten guardar el excedente de energía para su uso posterior, garantizando continuidad en el suministro (Naturgas, 2024; HOMER Energy, s.f.).

La integración adecuada de estos componentes permite optimizar la generación y



distribución eléctrica, ya sea de forma aislada o conectada al SIN (El Tiempo, 2023).

### **Bases de Datos Utilizadas por el Software**

Las herramientas de simulación emplean bases de datos externas que contienen información climática (radiación solar, velocidad del viento), costos de componentes, patrones de consumo energético y otros parámetros relevantes. Estos datos provienen de fuentes locales o internacionales, garantizando la precisión del análisis (AIEA, 2024).

### **Restricciones del Proyecto**

**Tiempo:** El desarrollo del proyecto debe completarse en 16 semanas, limitando la profundidad de algunas etapas.

**Recursos económicos:** No se cuenta con un presupuesto asignado; se priorizan herramientas gratuitas, de código abierto o provistas por la universidad.

**Disponibilidad de datos:** La obtención de información depende de la colaboración de instituciones, empresas y comunidades.

**Alcance geográfico:** El estudio se concentra en una región específica debido a limitaciones logísticas y de disponibilidad de datos.

**Acceso a tecnologías:** Se requiere disponibilidad de software especializado y acceso a laboratorios o equipos de simulación.



## Marco de referencias

El acceso a una energía confiable, asequible y sostenible es un pilar fundamental para el desarrollo social y económico de las comunidades rurales. En Colombia, a pesar de los avances en cobertura energética, persisten zonas no interconectadas (ZNI) o con acceso limitado al servicio eléctrico, lo cual restringe sus oportunidades de desarrollo. El corregimiento de Boquerón, como muchas otras regiones rurales, enfrenta desafíos relacionados con la baja calidad del suministro, la dependencia de combustibles fósiles y los altos costos de operación.

Ante esta situación, las tecnologías limpias, como los sistemas fotovoltaicos, eólicos o híbridos con almacenamiento en baterías, se presentan como alternativas viables para garantizar el abastecimiento energético de manera sostenible. La Ley 1715 de 2014 y la Estrategia Nacional de Transición Energética han incentivado la adopción de estas soluciones, especialmente en zonas rurales y aisladas, mediante esquemas de financiación, incentivos tributarios y apoyo institucional (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

Diversos estudios han demostrado que la implementación de sistemas energéticos descentralizados basados en energías renovables no solo mejora la calidad de vida de las comunidades, sino que también reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y genera impactos económicos positivos a largo plazo (Quintero et al., 2020). No obstante, la viabilidad de estos sistemas depende de múltiples factores, entre ellos las condiciones climáticas y geográficas del sitio, la demanda energética de la comunidad, los costos iniciales de inversión, la capacidad de operación y mantenimiento, y la aceptación social del proyecto.

Investigaciones como la de Martínez y Rodríguez (2019) han resaltado la importancia de realizar estudios de viabilidad técnico-económica antes de implementar este tipo de soluciones. Estos estudios permiten evaluar si las tecnologías propuestas son adecuadas para el contexto



local y si el proyecto puede ser autosostenible desde el punto de vista financiero y operativo.

En este sentido, el presente trabajo se inscribe dentro de un enfoque interdisciplinario que considera tanto las características técnicas de las tecnologías limpias como su impacto económico en el corregimiento de Boquerón. A través de un análisis detallado de viabilidad, se busca identificar una solución energética integral que responda a las necesidades reales de la comunidad, al tiempo que contribuya a los objetivos de desarrollo sostenible del país.

### **Metodología para la Sección y Desarrollo de la Solución**

La metodología aplicada en este proyecto se basa en un enfoque mixto que integra el análisis técnico, económico y social para evaluar la viabilidad de implementar un sistema energético basado en tecnologías limpias. Se desarrollaron las siguientes fases:

#### **Caracterización del Área de Estudio**

Se recopiló información sociodemográfica, climática y energética del corregimiento El Boquerón mediante fuentes primarias (entrevistas, encuestas) y secundarias (IDEAM, UPME, DNP). Esta etapa permitió conocer los patrones de consumo, disponibilidad de recursos renovables y necesidades energéticas locales.

#### **Diagnóstico Energético Actual**

Se identificó el estado actual del abastecimiento energético, incluyendo las fuentes utilizadas, niveles de cobertura, costos y limitaciones. Se analizaron posibles impactos ambientales y sociales derivados del modelo energético vigente.

#### **Dimensionamiento del Sistema Propuesto**

Utilizando los softwares HOMER pro (Eólica) y PVsyst (Solar) se modelaron diferentes escenarios de generación con energías limpias, incluyendo energía solar fotovoltaica, energía eólica y biomasa simulado en Excel además cuenta con respaldo mediante banco de baterías. Se



evaluaron combinaciones óptimas para cubrir la demanda con criterios de costo, confiabilidad y sostenibilidad.

### **Validación de la Propuesta**

Se presentaron los resultados a actores locales y expertos para recibir retroalimentación. Se ajustaron los parámetros del modelo y se definió la solución más viable desde los puntos de vista técnico, económico y social.

### **Desarrollo de la Solución**

Con base en los resultados obtenidos durante el análisis, se diseñó una solución integral compuesta por un sistema híbrido de generación de energía con fuentes renovables, adaptado a las condiciones particulares del corregimiento El Boquerón. El sistema seleccionado incluye:

1. Un campo solar fotovoltaico dimensionado para aprovechar la alta irradiancia solar promedio de la región.
2. Un aerogenerador de baja potencia, justificado por la presencia de velocidades de viento moderadas y constantes en ciertas épocas del año.
3. Un sistema de almacenamiento con baterías de litio, que permite garantizar la continuidad del servicio en horarios nocturnos y durante condiciones climáticas desfavorables.
4. Un inversor híbrido que gestiona la energía producida y suministrada al sistema eléctrico local.

Este diseño fue optimizado en HOMER pro para asegurar un suministro confiable durante todo el año. Además, se incorporaron criterios de mantenibilidad, escalabilidad y capacitación comunitaria para garantizar la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.



## Desarrollo Central

### *Sistema Fotovoltaico*

De acuerdo con la problemática del corregimiento y con la información recolectada en una parte de la finca utilizada para el dimensionamiento, se procedió a realizar el diseño del sistema mediante el software PVsyst, como se muestra en la Figura 1. Una vez obtenido el dimensionamiento y el informe del software, se procedió a ejecutar el análisis del CAPEX, ya que es fundamental para evaluar la información técnica, económica y la viabilidad del proyecto.

El CAPEX fue diseñado para el dimensionamiento preliminar, recopilación de datos y análisis de viabilidad. Este se distribuye en cuatro fases importantes: el dimensionamiento preliminar, que permite calcular los kWp; la recopilación de datos técnicos del sistema; los datos económicos; y el gráfico de flujo de caja.

MESES	COSNUMO kWh/MES	HSP	DIAS	100% CONSUMO	KWp
ENERO	2000	3,8	31	2000	16,978
FEBRERO	1800	3,8	28	1800	16,917
MARZO	1799	3,8	31	1799	15,272
ABRIL	1665	3,8	30	1665	14,605
MAYO	1660	3,8	31	1660	14,092
JUNIO	1286	3,8	30	1286	11,281
JULIO	1384	3,8	31	1384	11,749
AGOSTO	1560	3,8	31	1560	13,243
SEPTIEMBRE	1882	3,8	30	1882	16,509
OCTUBRE	1385	3,8	31	1385	11,757
NOVIEMBRE	1255	3,8	30	1255	11,009
DICIEMBRE	2184	3,8	31	2184	18,540
<b>TOTALES</b>	<b>19860</b>	<b>3,8</b>		<b>19860</b>	<b>14,33</b>
	1655			1655	
		Potencia	Cantidad	kWp	
PANELES		605	24	14,329	
INVERSORES		15	1		

**Figura VI. Dimensionamiento Preliminar.**

*Fuente: Elaboración propia*

Para el diseño preliminar se recolecta la información suministrada como los recibos del consumo de energía y ubicación geográfica para obtener la capacidad del sistema fotovoltaico. En esta tabla se diligencia con los consumos mensuales de cada mes, las horas solares picos



promedio del sitio, A partir de la cantidad de días de cada mes, se calcula la producción energética mensual, lo que permite determinar los kilovatios pico (kWp) requeridos en cada periodo. Posteriormente, se realiza un promedio de estos valores mensuales para obtener el kilovatio pico general necesario para el sistema. Con este dato definido, se procede a seleccionar el tipo de panel fotovoltaico más adecuado, así como la cantidad requerida para satisfacer la demanda energética proyectada. De igual manera, la elección del inversor se realiza en función de esta potencia pico estimada, garantizando así la eficiencia y estabilidad del sistema.

ITEM	DESCRIPCION	CANT
1	Panel Solar 605W	24
2	Inversores: On grid Trifásico 15kW	1
3	Estructura para paneles solares fotovoltaicos	GLB
4	Suministro de material eléctrico y tableros AC/DC para proyecto solar	GLB
5	Inspección RETIE, tramites ante operador de red, UPME	1
6	Diseños, instalación y puesta en marcha del sistema fotovoltaico.	1
7	Suministro e implementación sistema monitoreo de energía en tiempo real.	1
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 65.019.174</b>

**Figura VII. Tabla técnico-económica**

*Fuente: Elaboración propia*

En este cuadro se presentan los principales ítems que describen los componentes esenciales para la ejecución y materialización del proyecto, los cuales sirven como base para el cálculo del presupuesto. Estos ítems incluyen los paneles solares, inversores, estructuras de soporte para el sistema, materiales eléctricos (AC/DC), trámites ante el operador de red, diseños, ejecución del proyecto y el sistema de monitoreo en tiempo real. A partir del cálculo de estos elementos se determina el valor total de la inversión necesaria para el proyecto. Cada ítem cuenta con un desglose detallado que incluye cantidad de unidades, costos unitarios, costos totales, porcentaje de markup y utilidades proyectadas.

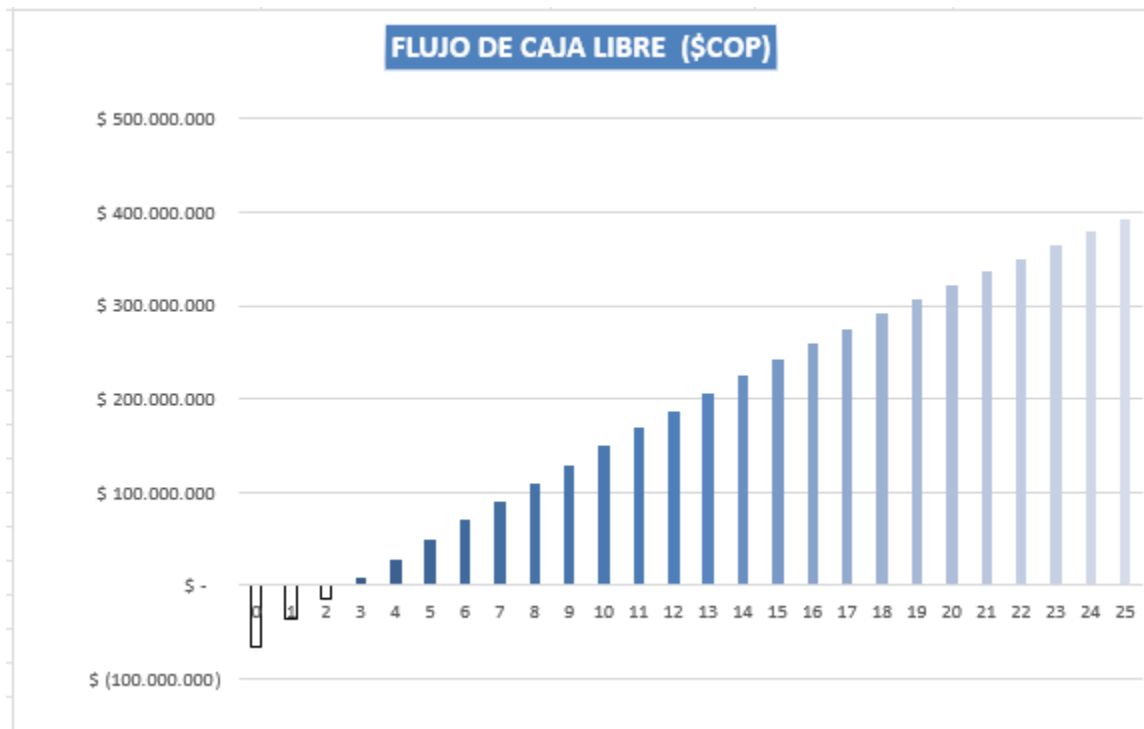


Datos económicos y financieros	Valor
INVERSION COP\$ del proyecto incluido IVA	\$ 65.019.175
INGRESOS OPERACIONALES POR GENERACION	\$ 467.620.483
Beneficio de Deducción del IVA del proyecto	\$ 7.110.045
Beneficio tributario deducción fiscal 50% del valor del proyecto	\$ 28.954.565
Beneficio tributario depreciación acelerada	\$ 1.737.274
Ahorro en costo de energía primer Año	\$ 20.562.925
Ahorro en costo de energía mensual Promedio	\$ 1.713.577
Operación y Mantenimiento del sistema Solar FV	1,50%
Costo Unitario de la Energía actual (CU)	\$ 1.012,00
IPC	5,24%
<b>LCOE (Precio de Energía) Sistema Solar FV Cop\$/kWh</b>	<b>\$ 171,52</b>
<b>TIR</b>	<b>35,49%</b>
Periodo de retorno en años (PAYBACK)	2,6

**Figura VIII. Tabla datos económicos y financieros**

*Fuente: Elaboración propia*

Teniendo en cuenta la inversión inicial, los beneficios tributarios y los costos de operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico, es posible calcular indicadores financieros clave como el Retorno de la Inversión (ROI), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Costo Nivelado de la Energía (LCOE). Este último permite determinar el costo por kilovatio generado por el sistema solar fotovoltaico, lo que facilita comparar dicho valor con la tarifa actual del operador de red. De esta manera, es posible cuantificar el ahorro real que genera el proyecto, además de obtener otros indicadores relevantes que permiten evaluar su viabilidad económica.



**Figura IX. Tabla flujo de caja**

*Fuente: Elaboración propia*

### **Sistema Eólico**

La implementación del proyecto se organizó en etapas secuenciales, que van desde un diagnóstico inicial hasta la validación de los resultados:

Planificación y revisión documental: Se realizó una recopilación de información sobre el potencial eólico del Boquerón y la normativa colombiana pertinente. Además, se analizaron informes de recursos renovables para entender el contexto local en Boquerón. En esta fase se establecieron el alcance, los cronogramas y los criterios técnicos del estudio.

Trabajo de campo: Durante esta etapa, se llevaron a cabo varias visitas a la finca en Boquerón para valorar la disponibilidad y las características del terreno. Se analizaron las condiciones topográficas (pendientes y altitud) utilizando equipamiento de campo (GPS y clinómetro) y se recogieron datos meteorológicos directamente en el lugar. Se estimaron los



datos de la velocidad y dirección del viento durante breves periodos, con el propósito de ajustar los datos locales. Es importante mencionar que la medición del viento es crucial para elegir los lugares más apropiados para la instalación de turbinas eólicas, ya que, estos estudios pretenden determinar con precisión la velocidad y la dirección del viento utilizando instrumentos especializados (anemómetros, veletas, barómetros). Al mismo tiempo, se registró el estado de la infraestructura existente (accesos, red eléctrica) y la disponibilidad de espacio para situar el aerogenerador.

**Procesamiento de datos y análisis:** Los datos recolectados fueron sujetos a un análisis cuantitativo. En primer lugar, se procesaron los datos meteorológicos para extraer estadísticas relevantes: la velocidad promedio del viento durante el año, su distribución en diferentes estaciones, ráfagas máximas, entre otros. Se utilizó la herramienta WRPlot para crear rosas de viento basadas en las mediciones, permitiendo observar la frecuencia del viento de acuerdo con su dirección y velocidad. Al mismo tiempo, se diseñaron modelos topográficos simples para definir las características del lugar. Esta información sirvió para parametrizar los diferentes escenarios energéticos.

**Simulación con HOMER Pro:** Cada escenario contempló el aerogenerador propuesto, sistemas complementarios posibles (como baterías y cargas de la finca) y los perfiles de viento adquiridos. HOMER Pro es un software bien conocido en el ámbito de microrredes híbridas, desarrollado inicialmente por el NREL y se le considera el estándar global para optimizar el diseño de microrredes en diversos sectores. Se modeló, de este modo, la generación anticipada y la operativa del sistema eólico-híbrido durante el año, estimando parámetros como la producción eléctrica anual, el factor de capacidad y el costo nivelado de energía (LCOE).

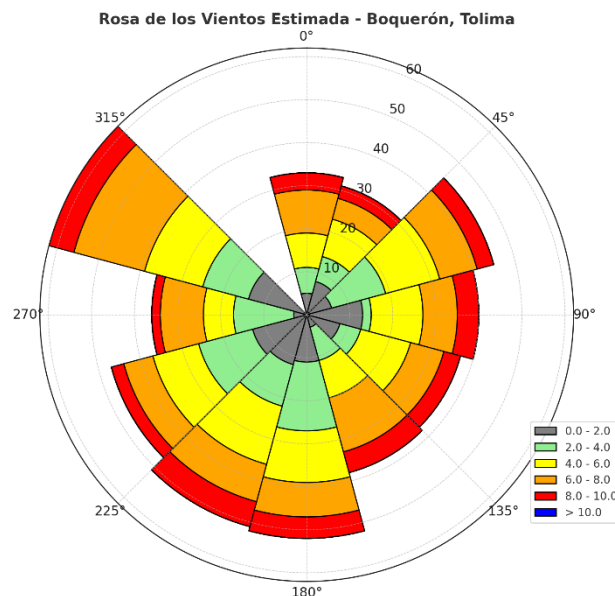
**Evaluación de resultados y validación:** Finalmente, se procedió a examinar los resultados



de las simulaciones para evaluar su viabilidad técnica y económica. Se contrastaron los resultados del modelo con datos externos o cálculos manuales para asegurar su consistencia. La validación abarcó la verificación de la correspondencia entre los datos medidos y los valores promedios simulados; por ejemplo, se consideraba aceptable que la velocidad media anual calculada por HOMER fuese similar a la que se registró en el lugar o en los atlas eólicos.

### Herramientas y técnicas utilizadas

Para realizar las etapas mencionadas se utilizaron varias herramientas en el campo y programas informáticos especializados: Instrumentación meteorológica de campo: Se hicieron estimaciones de la velocidad del viento



**Figura X. Rosa de los vientos**

*Fuente: Elaborada por WRplot*

WRPlot (software para rosáceas de viento): Esta herramienta se utilizó para el análisis de datos meteorológicos, específicamente para crear rosas que representan la dirección del viento. A través de WRPlot se procesaron las velocidades de viento estimados, lo que permitió visualizar



cómo se distribuyen las direcciones y frecuencias de vientos predominantes en Boquerón.

HOMER Pro: Este es un programa para simular sistemas de energía híbrida. HOMER Pro ayudó a modelar diferentes escenarios de producción eólica, incluyendo aerogeneradores, baterías y cargas, así como a calcular indicadores económicos (LCOE, costo neto presente) y de rendimiento. Según su documentación, HOMER Pro, combina el modelado ingenieril con el análisis económico para mejorar el rendimiento de microrredes. Software estadístico y de apoyo: Para el análisis de datos, se usaron hojas de cálculo en Excel.

La validación de los resultados se centró en garantizar que hubiera concordancia entre los datos reales y las simulaciones. Se definieron criterios tales como: (a) Consistencia meteorológica: se compararon la velocidad media anual y la rosa de viento obtenidas en el sitio con las proyecciones de viento modeladas por HOMER. Un buen ajuste sugeriría que el modelo refleja adecuadamente el recurso. (b) Concordancia de producción: se revisó que la generación eléctrica anual que calcula HOMER sea coherente con estimaciones manuales basadas en potencias nominales y factores de capacidad comunes. (c) Indicadores económicos: se verificó que el LCOE y otros indicadores obtenidos estén dentro de márgenes razonables en el mercado de energía eólica en Colombia.

### ***Limitaciones del estudio***

Se identifican las siguientes limitaciones relacionadas con la metodología utilizada; para reducir esta incertidumbre, se usaron datos complementarios de reanálisis y se aplicaron metodologías de extrapolación comunes, aunque la ausencia de un registro multianual es una limitación.

- Simplificaciones del modelo: HOMER Pro asume condiciones de operación ideales y parámetros fijos (como la eficiencia constante de la turbina y la plena disponibilidad).



- Los aspectos dinámicos reales (desgaste mecánico, interrupciones técnicas, efectos específicos del terreno) no se modelaron en profundidad, por lo que los resultados numéricos deben interpretarse bajo estos supuestos.
- Modelo de carga y escenario energético: El estudio se enfocó en la generación de la turbina eólica (y opcionalmente la batería) sin incorporar completamente un perfil de demanda específico del predio. Esto implica que la evaluación económica se basó en escenarios generales, lo cual simplifica la realidad operativa.
- Factores externos no considerados: No se abordaron en detalle variables socioambientales, normativas locales o posibles efectos ecológicos del proyecto. El análisis se limitó a la viabilidad técnica y energética; temas como permisos, impacto social o financiamiento específico no fueron parte de esta etapa.
- Dependencia de información secundaria: Algunos insumos, como los precios de los equipos y los datos climáticos regionales, fueron obtenidos de fuentes secundarias o de bibliografía, lo que puede provocar variaciones a lo largo del tiempo o no reflejar de manera completa las condiciones micro climáticas del lugar.
- Estas limitaciones fueron consideradas al analizar los resultados: aunque restringen la profundidad del estudio, no impiden reconocer las tendencias generales ni formular recomendaciones preliminares para la instalación de la turbina eólica en la finca de Boquerón.
- Referencias de la metodología: Se utilizó técnicas estandarizadas para investigaciones sobre energía eólica y sistemas híbridos, las cuales fueron adaptadas al contexto colombiano y a los recursos disponibles en el proyecto.



### *Sistema Biomasa*

Se muestra un modelo conceptual de un biodigestor anaeróbico: (1) entrada de estiércol mezclado con agua, (2) acción de bacterias en el reactor que generan metano, (3) canalización del biogás hacia un quemador o generador, y (4) utilización de los residuos digeridos como fertilizante. Este diagrama sirve para identificar variables importantes durante las visitas al campo (por ejemplo, flujo del sustrato y productos generados) y para parametrizar la simulación. Asimismo, se destaca la importancia de los registros visuales y fotográficos para registrar las diferentes fases del proceso y los materiales orgánicos analizados.

El diseño metodológico tiene un enfoque exploratorio-descriptivo. Se comienza con una revisión detallada de la literatura sobre biodigestores, parámetros energéticos y herramientas de simulación. Luego se lleva a cabo un trabajo de campo específico que incluye visitas de exploración a la finca para caracterizar su infraestructura y establecer acuerdos con los propietarios. Se establecen indicadores cuantitativos (como la cantidad de estiércol, temperatura del ambiente y el consumo energético de la finca) y cualitativos (como las condiciones de funcionamiento y las prácticas de manejo) para sustentar el modelo. El análisis sigue las pautas del diseño de sistemas energéticos: primero se recogen datos principales en el lugar, luego se procesan estadística y finalmente se validan mediante simulación en HOMER Pro. La metodología mezcla herramientas de recolección de datos con el respaldo de la simulación como herramienta para optimizar el diseño energético.

### **Trabajo de Campo**

Las fases en el campo incluyen las siguientes tareas, cada una diseñada para recopilar información esencial para el modelo energético:

Visita inicial a la finca: se realizan entrevistas con los propietarios y empleados para entender



las actividades agrícolas, el número de animales y cultivos, los hábitos de consumo energético y el manejo de desechos. En esta fase se planifica la recolección de datos: se crean herramientas (encuestas, hojas de registro, pesas o recipientes de medición) y se organiza el levantamiento topográfico básico del terreno.

**Caracterización del terreno:** se evalúa la topografía (inclinaciones, dirección) y la clase de suelo, así como la disposición de infraestructuras (establo, pozos, cercanía a cuerpos de agua). Se documenta la presencia de áreas sombreadas o de exposición solar, lo cual afectará el diseño del biodigestor y los posibles sistemas fotovoltaicos auxiliares.

**Inventario de materia orgánica:** se mide la disponibilidad de desechos (estiércol de ganado, restos de cosechas, residuos de cocina de origen animal) durante un periodo representativo. Esto incluye un pesaje directo de lotes de estiércol o el cálculo de volumen en baldes/cornales, de manera similar a lo que se ha reportado en proyectos análogos. Se calculan promedios diarios y estacionales de producción de materia orgánica, basándose en datos históricos de alimentación y reproducción en la finca.

**Medición de variables climáticas y ambientales:** se colocan termómetros o sensores portátiles para monitorear la temperatura ambiente, la cual es vital para la digestión anaeróbica. Dado que los biodigestores mesófilos funcionan mejor entre 32 y 35°C, se realizan mediciones diarias (máximas y mínimas) para definir el rango de temperatura. También se registra la humedad relativa, la precipitación y la velocidad del vientos para analizar las condiciones ambientales.

Los datos recolectados en el campo serán organizados en hojas de cálculo para su evaluación. Se calcularán los promedios mensuales de producción de estiércol y los perfiles de temperatura a lo largo del día. Con base en el inventario de materia orgánica disponible, se



proyectará la producción de biogás: se utilizarán factores de conversión para calcular el volumen generado diariamente. También se establecerán parámetros físicos como la proporción de materia seca del sustrato, la concentración de metano esperada y la eficiencia estimada del convertidor (motor/generador de biogás). Todos estos datos (producción de biogás, contenido de metano, rendimiento térmico y eléctrico del generador, temperaturas operativas, pérdidas del sistema) servirán como insumos para la simulación en HOMER Pro. En concreto, se asumirá que el digestor funciona en un régimen mesófilo ( $\sim 35^{\circ}\text{C}$ ), manteniendo la estabilidad térmica para optimizar la producción de metano.

### **Simulación en HOMER Pro: Configuración y Análisis Energético**

Para evaluar la factibilidad energética se construirá un modelo en HOMER Pro que incluya las tecnologías propuestas y los datos del campo. Se configurarán los siguientes elementos:

Recursos y cargas: se define la ubicación geográfica exacta (Boquerón, Colombia) para obtener datos climáticos (radiación solar, temperatura, viento). Se introduce el perfil de demanda eléctrica de la finca (iluminación, bombeo, motores) estimado a partir de encuestas y mediciones de consumo.

Componentes del sistema: se incorporan los elementos energéticos de la propuesta. HOMER permite modelar múltiples fuentes: por ejemplo, paneles fotovoltaicos para generar energía eléctrica, turbina de viento (si aplica) y la planta de biogás como fuente de biomasa

En este caso se incluirá: (a) biodigestor de 80 L conectado a un motor-generador de gas, que convierte el biogás en electricidad y calor; (b) sistema fotovoltaico (opcionalmente) para complementar producción; (c) baterías para almacenar excedentes; y (d) generador de respaldo diésel para emergencias. Cada componente se parametriza con eficiencia, costos de



inversión/mantenimiento, vida útil y otros parámetros técnicos.

Parámetros de operación: se configuran los valores calculados en base a los datos de campo: flujo de entrada de sustrato al digester, rendimiento energético del biogás, factor de capacidad del motor, entre otros. HOMER permite especificar la composición del combustible (porcentaje de  $\text{CH}_4$ ) y la curva de eficiencia del generador, lo cual se define según literatura y datos locales. Asimismo, se establecen tasas de mezcla de residuos y tiempos de retención para que el biodigester opere dentro de parámetros reales.

Ejercicio de simulación: el modelo se simula por un horizonte de 20 años (8760 horas/año), con ciclos horarios de energía. En cada hora, HOMER compara la oferta de energía (biogás, solar) con la demanda, administrando la carga de baterías y operación del generador.

Se realizan análisis de sensibilidad variando costos y parámetros clave, para garantizar resultados robustos. Finalmente, HOMER entrega una lista de configuraciones factibles, ordenadas por costo de ciclo de vida facilitando la selección de la opción más viable en términos técnico-económicos. Se revisan los resultados energéticos (producción anual de cada fuente, porcentaje de demanda cubierta) y de costo (Costo Nivelado de Energía, reemplazos, mantenimiento), así como indicadores de fiabilidad (horas).



## Análisis de Resultados



**Figura I. Simulación Solar Finca Boquerón**

*Fuente: Elaboración propia "PVsyst".*

De acuerdo con la simulación realizada en el software PVsyst, se logró dimensionar un sistema solar fotovoltaico para la finca Boquerón, la cual presenta una demanda demasiado alta en el suministro de energía. Con base en el consumo del área y la capacidad instalada del transformador, se diseñó un sistema de 14,52 kWp compuesto por 24 módulos fotovoltaicos de 605 W cada uno y un inversor de 15 kW. El análisis arrojó una viabilidad técnica y económica del 100%, con una inversión considerada justa y un periodo de retorno (payback) estimado en 2,6 años. Por tanto, el sistema fotovoltaico representa la alternativa más viable para la finca Boquerón en términos de rentabilidad y eficiencia energética.



## Sistema Eólico



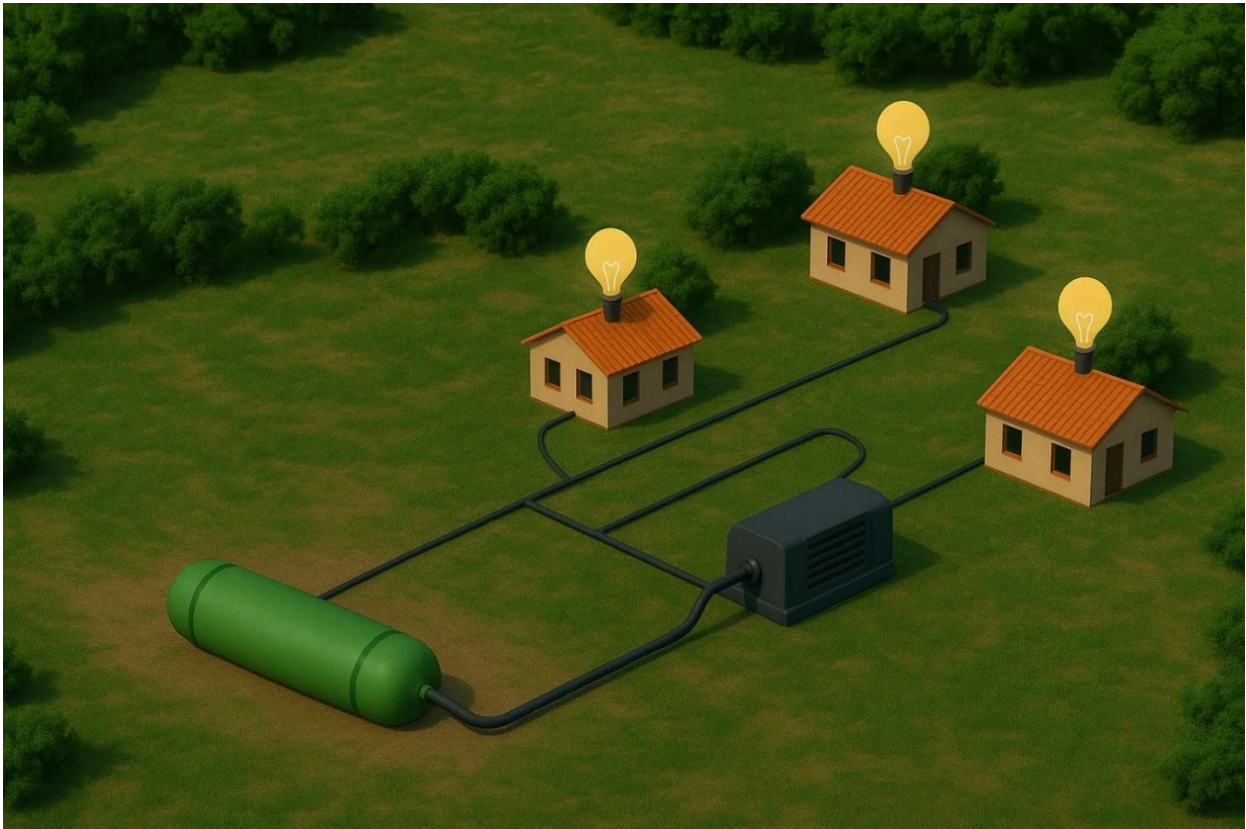
**Figura II. Simulación eólica Finca Boquerón**

*Fuente: Elaboración propia*

En la figura anterior se presenta una simulación realizada en HOMER Pro, la cual incluye dos aerogeneradores de 20 kW cada uno, diseñados para suplir la demanda energética de cuatro viviendas en la finca El Boquerón. Al analizar la viabilidad de implementar esta tecnología, se identificó un alto costo de inversión y una baja capacidad de generación. Como resultado, se concluye que no es viable utilizar la energía eólica como fuente principal de generación eléctrica en esta zona, debido a que la velocidad del viento no es suficiente para garantizar un suministro energético confiable. Por lo tanto, esta tecnología no logra satisfacer adecuadamente las necesidades del corregimiento.



## Sistema Biomasa



**Figura III. Simulación biodigester Finca Boquerón**

*Fuente: Elaboración propia*

En la figura anterior podemos apreciar una simulación de un biodigester realizado en el software de HOMER Pro, en la cual se puede apreciar el montaje de un biodigester el cual alimenta o suple la demanda generada por las cuatro viviendas del corregimiento. Podemos analizar que el biodigester ocupa un menor espacio a la hora de ser ubicado en el territorio teniendo en cuenta diversos factores como costos de construcción, tiempo de generación de energía, factores ambientales los cuáles benefician este sistema, pero teniendo un grave problema en relación con el tema de generación de energía por los tiempos de descomposición y la cantidad de energía que se pueda generar dejando de ser viable por estos factores.



## Análisis de Costos

### Sistema Solar

Para el diseño e instalación del sistema solar fotovoltaico en la finca Boquerón, se realizó una evaluación detallada de los componentes y servicios necesarios, lo que permitió construir una tabla de costos bien distribuida.

El componente más costoso del sistema corresponde al suministro de materiales eléctricos y tableros AC/DC, con un valor de \$11.848.320 COP, seguido por los paneles solares de 605W, el cual el costo asciende a \$11.499.840 COP, ambos elementos fundamentales para el funcionamiento del sistema. Además, se integró un inversor trifásico de 15 kW, valorado en \$8.988.000 COP, el cual garantiza la conversión eficiente de la energía.

El resto de la inversión se distribuye entre la estructura de soporte, servicios de diseño e instalación, inspecciones, trámites ante UPME y RETIE, así como la implementación del sistema de monitoreo en tiempo real. También se contemplan costos adicionales para conexión simplificada, coordinación de protecciones y medidor bidireccional.

Costo total del proyecto

\$65.019.175 COP (IVA incluido)

Costo sin IVA: \$57.909.130 COP

Este valor incluye el costo completo de materiales, instalación y legalización del sistema, asegurando que esté listo para operar desde el inicio. Se logró así un balance entre eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad, lo que consolida el sistema solar como la alternativa más viable frente a otras soluciones energéticas evaluadas, destacándose también como la opción más rentable para suplir la demanda energética de la finca Boquerón.



## Sistema Eólico

En la simulación realizada en HOMER Pro se contempló un sistema compuesto por dos aerogeneradores con el fin de abastecer energéticamente a cuatro viviendas ubicadas en el

Componente	Cantidad	Costo unitario (USD)	Subtotal (USD)	Costo unitario (COP)	Subtotal (COP)
Turbinas eólicas 10 kW	2 unidades	55000	110000	\$ 233.860.000	\$ 467.720.000
Baterías de plomo-ácido 1 kWh	~80 kWh	200	16000	\$ 850.400	\$ 68.032.000
Inversor híbrido + controlador	1 sistema	5000	5000	\$ 21.260.000	\$ 21.260.000
Cableado e instalación	4 casas (~50 m c/u)	1000	4000	\$ 4.252.000	\$ 17.008.000
Torres y cimentaciones	2 torres	4000	8000	\$ 17.008.000	\$ 34.016.000
Mano de obra y permisos	-	7000	7000	\$ 29.764.000	\$ 29.764.000
Total estimado CAPEX			150000		\$ 637.800.000

En la finca el Boquerón. Se pretende analizar el CAPEX (gasto de capital) asociado a esta alternativa tecnológica, se identificó que la inversión inicial es considerablemente alta. Esto se debe, principalmente, al elevado costo de adquisición e instalación de los aerogeneradores, que además requieren infraestructura adicional como bases estructurales, sistemas de conversión (inversores), cableado, sistemas de control y almacenamiento de energía mediante baterías.

El principal problema identificado es que la velocidad promedio del viento en la zona no permite que los aerogeneradores funcionen a su capacidad óptima. Esto les indica que, a pesar de hacer una inversión alta, la energía generada es limitada, lo cual reduce notoriamente la eficiencia del sistema y afecta negativamente el retorno de inversión. En consecuencia, el costo por cada kWh generado es elevado, superando ampliamente al de otras tecnologías renovables como en este caso la solar fotovoltaica.



## Sistema Biomasa

**Figura V. Simulación biodigestor Finca Boquerón**

Componente	Cantidad	Costo unitario (COP)	Subtotal (COP)
Geomembrana PVC/PEAD calibre 20	9 m <sup>2</sup>	35.000	315.000
Tubo PVC 2"	4 m	26.725	106.900
Tubo PVC 1"	2 m	11.750	23.500
Codos y accesorios PVC	6 unidades	5.000	30.000
Válvulas (gas y digestato)	2 unidades	19200	38.400
Manguera para gas	4 m	5.000	20.000
Tanques plásticos 100 L	2 unidades	100.000	200.000
Abrazaderas metálicas	4 unidades	2.000	8.000
Sellador PVC	1 frasco (250 ml)	10.000	10.000
Estiércol (sustrato inicial)	60 kg	500	30.000
Estacas y cuerda de soporte	6 estacas + 4 m cuerda	5.000	30.000
Mano de obra e instalación	-	250.000	250.000
Total estimado CAPEX	-		1.061.800

*Fuente: Elaboración propia*

Para la construcción del biodigestor se requiere una investigación previa para reconocer los materiales necesarios para su elaboración de este, con esto logramos realizar una tabla de costos bien distribuida entre todos los materiales necesarios para la construcción del biodigestor. El elemento más costoso para la construcción de este es la geomembrana teniendo un valor de 315.000 COP, la cual representa una parte importante de la elaboración del biodigestor a esto se le suma un tanque plástico de 100 litros contener sustancias. El resto del valor del biodigestor se reparte entre las tuberías, válvulas y accesorios.

De forma general, el proyecto tiene un costo estimado de \$ 1.061.800 COP. Con esto podemos decir esta cifra incluye el cobro total de los materiales y la instalación con esto también les aseguramos de que el sistema tenga todos los componentes necesarios para el buen funcionamiento de este desde un inicio, el valor restante del biodigestor se distribuye entre abrazaderas, mangueras, estacas, cuerda y sellador, son materiales imprescindibles y sumamente



importantes para el funcionamiento y estabilidad del biodigestor con esto pudimos encontrar un balance entre funcionalidad accesibilidad y sostenibilidad.



## Conclusiones

Se llega a la conclusión sobre los hallazgos del diagnóstico efectuado, que muestra que la población del corregimiento del Boquerón cuenta con una infraestructura energética inadecuada, caracterizada por una dependencia elevada de generadores de diésel y una cobertura eléctrica restringida. La dispersión del territorio, las condiciones de acceso y la falta de redes sólidas han complicado la continuidad del servicio, impactando de manera directa en la calidad de vida y el desarrollo económico de la zona. Este estudio permitió reconocer las principales limitaciones técnicas y financieras del modelo energético vigente y respalda la necesidad de avanzar hacia fuentes de energía renovable.

Mediante la utilización de programas de simulación como PVsyst y HOMER Pro, se logró crear modelos de varios escenarios tecnológicos para el suministro de energía en el corregimiento. Estas simulaciones facilitaron la identificación de la distribución más adecuada de los sistemas, la cantidad de elementos necesarios y el rendimiento anticipado de cada opción energética. Así, la presentación de los resultados mostró que el sistema solar fotovoltaico tiene la mayor capacidad de cobertura con una inversión menor, mientras que las alternativas de energía eólica y biomasa mostraron restricciones técnicas o de eficacia.

El estudio concluyó que un sistema solar fotovoltaico es la mejor opción para la zona, siendo eficiente y ecológico. Se prevé un retorno de la inversión en ules 2,6 años, y los bajos costos de operación a largo plazo lo hacen ideal para Boquerón, dado su clima y consumo. Los sistemas eólicos y de biomasa tienen limitaciones que impiden su uso como fuente principal de energía. La propuesta también incluye criterios de sostenibilidad, capacidad de expansión y facilidad de mantenimiento, lo que la hace relevante para financiamiento o instituciones.



## Agradecimientos

Al concluir este trabajo, deseamos manifestar nuestro más profundo agradecimiento a todas las personas que estuvieron a nuestro lado y nos brindaron su apoyo en la realización de este proyecto.

Primero que todo, agradecemos al profesor Álvaro David Arévalo Salazar por su orientación, dedicación y aportes académicos invaluable, los cuales fueron fundamentales para dirigir y enriquecer nuestra investigación.

Asimismo, queremos mostrar nuestra gratitud al Ingeniero Julián Hernández, cuya asistencia técnica y disponibilidad constante nos ofrecieron el apoyo necesario para enfrentar los desafíos que surgieron durante el proceso.

Por último, a nuestras familias, que con su amor, comprensión y apoyo incondicional nos acompañaron en cada fase del camino. Su respaldo emocional y motivacional fueron claves para lograr este éxito.



### Referencias bibliográficas

Agencia Internacional de Energía. (2022). World energy outlook 2022. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

Agencia Internacional de Energía Atómica. (2024, abril 17). ¿Qué es la energía nuclear? La ciencia de la energía nucleoelectrica. <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-energia-nuclear-la-ciencia-de-la-energia-nucleoelectrica>

Agropinos. (2023, enero 10). Cómo aprovechar las aguas lluvias. <https://www.agropinos.com/blog/como-aprovechar-las-aguas-lluvias>

Alonso, J. A. (2024). Monocristalino vs policristalino: Diferencias, pros y contras. <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/monocristalino-vs-policristalino-diferencias-pros-y-contras/>

Banco Mundial. (2021, septiembre 28). La participación ciudadana resulta vital para el éxito de los proyectos de energía renovable en Chile. <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2021/09/28/la-participaci-n-ciudadana-resulta-vital-para-el-xito-de-los-proyectos-de-energ-a-renovable-en-chile>

Banco Mundial. (2024, noviembre 16). Banco Mundial apoyará el incremento y mejora del acceso a electricidad sostenible en comunidades rurales de Bolivia. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2023/11/16/the-world-bank-will-help-increase-and-improve-access-to-sustainable-electric-power-in-rural-communities-of-bolivia>

BBVA. (2024, julio 15). ¿Qué es la biomasa? El aprovechamiento de lo orgánico. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-biomasa-el-aprovechamiento-de-lo-organico/>

Benavides, J., Cabrales, S., & Delgado, M. E. (2022). Transición energética en Colombia: Política, costos de la carbono-neutralidad acelerada y papel del gas natural.



[https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/4318/Repor\\_Agosto\\_2022\\_Benavides\\_Cabrales\\_y\\_Delgado.pdf](https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/4318/Repor_Agosto_2022_Benavides_Cabrales_y_Delgado.pdf)

Blanco, T. A. (2024, agosto 27). Energía eólica: ¿Qué es, cómo funciona y cuáles son sus beneficios? BBVA. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-eolica-la-importancia-del-viento-como-renovable/>

Celco, W. (2023). ¿Cómo la instalación de energía solar beneficia a la salud y a la educación? CELCO. <https://celco.com.co/instalacion-de-energia-solar-beneficia-a-la-salud-y-educacion/>

Confidencial Noticias. (2024, julio 14). Pequeñas centrales hidroeléctricas: Una solución sostenible para Colombia. <https://confidencialnoticias.com/opinion/pequenas-centrales-hidroelectricas-una-solucion-sostenible-para-colombia/2024/07/14/>

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (5ª ed.). Sage Publications.

De Medio Ambiente y Recursos Naturales, Secretaría. (s.f.). Beneficios de usar energías renovables. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/beneficios-de-usar-energias-renovables>

El Tiempo. (2023, agosto 18). ¿Qué es el Sistema Interconectado Nacional en Colombia? <https://www.eltiempo.com/economia/empresas/que-es-el-sistema-interconectado-nacional-en-colombia-791799>

Congreso de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Diario Oficial No. 49.129.

Energy Solution Solar. (2023). How much water do solar panels use vs. fossil fuels? <https://energysolutionsolar.com/blog/how-much-water-do-solar-panels-use-vs-fossil-fuels>



Enel. (2022, abril 18). Agua: El gran generador de energía.

<https://www.enel.com.co/es/historias/a202008-agua-el-gran-generador-de-energia.html>

Enel. (2022, junio 17). Energía eólica: Una fuente renovable.

<https://www.enel.com.co/es/historias/a202206-energia-eolica-una-fuente-renovable.html>

Endesa. (2021, agosto 13). Energía geotérmica: Qué es y cómo funciona.

<https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/energia-geotermica>

Factorenergia, E. T. E. (2023, mayo 15). Energía solar: Todo lo que tienes que saber.

<https://www.factorenergia.com/es/blog/autoconsumo-electrico/energia-solar/>



Anexos

<https://drive.google.com/drive/folders/1ybKKeltV0RGX33EP6p122jYnAZsXKUPO?usp>

[=drive link](#)