

Evaluación de alternativas para el suministro energético del corregimiento Llano de Palmas,
Santander, empleando fuentes no convencionales de energía renovable

Cristian Fabian Serna Sánchez, Franklin Duván Díaz Cadena y Diego Fernando Carreño

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingenieros Electricistas

Director

Gabriel Ordóñez Plata

Doctor en Ingeniería Industrial, área Ingeniería Eléctrica

Codirector

Johan Farith Petit Suárez

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Wilman Morales Rey

Magister en Administración

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Agradezco a Dios por dotarme de habilidades y disciplina para superar los desafíos a lo largo de este camino, así como por concederme la sabiduría necesaria para alcanzar este logro. A mi familia, les expreso mi profundo agradecimiento por su amor incondicional, su infinita paciencia y su apoyo inquebrantable en la realización de mis sueños, valorando mucho todo el esfuerzo y sacrificio que han dedicado.

Franklin Duvan Díaz Cadena

A Dios por llenarme de fortaleza, sabiduría y guiarme en cada uno de los retos asumidos. A mis seres queridos, en especial a mi familia por ser mi pilar para seguir adelante y a cada uno de mis compañeros y profesores que estuvieron en el proceso académico, los cuales me guiaron y me apoyaron para culminar de manera satisfactoria.

Cristian Fabian Serna Sánchez

A Dios por ser esa fuente inagotable de sabiduría y guía, cuya influencia fue fundamental en cada fase de mi desarrollo académico. A mi madre, cuyo amor incondicional y apoyo constante fueron mi mayor inspiración. A mis compañeros de estudio, con quienes compartí risas, superamos desafíos y celebramos triunfos.

Diego Fernando Carreño

Agradecimientos

Expreso mi profundo agradecimiento al Todopoderoso por haberme permitido alcanzar cada uno de mis propósitos y por haber sido mi compañía en los momentos más desafiantes. Agradezco su ayuda diaria para avanzar hacia mi felicidad. A mis padres (Oscar y Amparo) les dedico un especial reconocimiento por su inmenso amor, apoyo constante y sacrificio incansable que ha sido fundamental para lograr este éxito. A mis abuelos (Juan, Bertina, Daniel y Rebeca) les agradezco por su guía, amor incondicional y sabios consejos que han iluminado mi camino. A mi hermana Karen, quien ha sido mi pilar y fuente de motivación, por lo que le expreso mi más sincero agradecimiento. A toda mi familia, incluyendo tíos, tías y primos, les agradezco haber contribuido a forjar el carácter inquebrantable que hoy me representa. A mis docentes por ser mi inspiración, en especial al Ingeniero. Luis Carlos Navarro y al Ingeniero. Jairo Gómez Tapias, quienes vieron en mí un gran potencial como profesional y como persona. Mi gratitud al Dr. Gabriel Ordóñez Plata, por su invaluable guía y consejos durante la elaboración de este trabajo de grado. A cada persona que me brindó ayuda y acompañamiento en este camino, mi más sincero agradecimiento.

Franklin Duvan Díaz Cadena

A Dios por permitirme cumplir todas mis metas, por ayudarme y guiarme en cada uno de los retos asumidos en mi formación académica. A nuestro director al Dr. Gabriel Ordóñez Plata por su orientación experta, paciencia y apoyo continuo a lo largo de este proceso. Su sabiduría y experiencia han sido fundamentales para dar forma y mejorar este trabajo. A los codirectores el Dr. Johan Farith Petit Suarez y el Master Wilman Morales Rey por su colaboración y guía al desarrollo de este trabajo de grado. A mis compañeros por sus valiosos aportes, discusiones y

comentarios constructivos que han enriquecido enormemente la calidad de este trabajo. A mi familia por el apoyo incondicional, su aliento constante y comprensión durante los momentos desafiantes fueron el impulso que necesitaba para seguir adelante.

Cristian Fabian Serna Sánchez

A Dios por iluminar cada paso de mi trayectoria académica y proporcionarme la fortaleza para superar los desafíos presentados durante el proceso de formación profesional. Su presencia ha sido importante para poder cumplir todas mis metas. A mi madre, Sandra Liliana Carreño, cuyo esfuerzo incansable y amor incondicional han sido pilares fundamentales. Su dedicación ha sido una inagotable fuente de motivación que me ha impulsado a superar los diferentes obstáculos presentados. A los respetados profesores por la calidad de la educación impartida y la dedicación demostrada para cultivar el aprendizaje en cada uno de nosotros. A nuestro director el Dr. Gabriel Ordoñez Plata y a los codirectores el Dr. Johan Farith Petit y el Ing. Wilman Morales Rey. Su valiosa contribución y asesoramiento han sido fundamentales para el desarrollo exitoso de este trabajo de grado. A mis compañeros de estudio por el apoyo mutuo a lo largo de esta travesía académica.

Diego Fernando Carreño

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
Generalidades del trabajo de grado.....	16
1.1. Alcance del estudio	16
1.2. Objetivo general.....	17
1.3. Objetivos específicos	17
2. Marco referencial	18
2.1. Experiencias de otros países empleando fuentes de energía renovables	18
2.2. Desarrollo de políticas en Colombia para emplear fuentes de energía renovables...	20
2.3. Energía solar	21
2.4. Energía eólica.....	22
2.5. Energía hidráulica	23
2.6. Biomasa.....	24
2.7. Comunidades Energéticas.....	25
3. Caracterización del centro poblado del corregimiento de Llano de Palmas	26
3.1. Descripción de la zona de estudio.....	26
3.2. Descripción de la ruta de acceso al centro poblado Llano de Palmas.	28
3.3. Uso del Suelo	30
3.4. Riesgos sísmicos e inundaciones	31
3.5. Identificación de las necesidades energéticas específicas de la comunidad	32
4. Análisis de alternativas para el suministro energético	34
4.1. Analisis de disponibilidad del recurso solar	34

4.2.	Análisis de disponibilidad del recurso hidráulico	36
4.3.	Análisis de disponibilidad del recurso de viento	38
4.4.	Análisis de disponibilidad del recurso de biomasa	39
5.	Cálculo de la demanda de energía eléctrica	42
5.1.	Caracterización de carga de cada una de las fronteras comerciales eléctricas existentes que incluye perfiles de carga de energía activa y reactiva.....	42
5.2.	Agregación de la demanda de los participantes de la comunidad energética: consumos individuales y agregados, construcción de la curva de demanda (en potencia y energía, horaria)	46
6.	Dimensionamiento del sistema de generación solar	47
6.1.	Espacio disponible	48
6.2.	Disposición física de los paneles fotovoltaicos	49
6.3.	Demanda total	50
6.4.	Generación	51
6.4.1.	Paneles fotovoltaicos	51
6.4.2.	Inversores	52
6.4.3.	Arreglos.....	53
6.4.4.	Diagrama unifilar	54
6.4.5.	Estructuras.....	54
6.4.6.	Estudios de sombras.....	54
6.4.7.	Estimación de la producción de energía	55
6.5.	Propuesta de la posible frontera de comercialización.....	58
6.6.	Estimación de la huella de carbono	59

6.7.	Simulación del sistema de Autogeneración Colectiva (AGRC).....	60
6.8.	Análisis económico del proyecto	64
6.8.1.	Estimación del CAPEX.....	64
6.8.2.	Estimación del OPEX	65
6.8.3.	Costos estimados de producción – LCOE	66
6.9.	Características del sistema fotovoltaico propuesto	69
7.	Conclusiones y recomendaciones	71
7.1.	Conclusiones	71
7.2.	Recomendaciones	73
	Referencias.....	75
	Apéndices.....	78

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Tipos de procesos para convertir la biomasa en energía.</i>	40
Tabla 2. <i>Caracterización de carga comunidad Llano de Palmas.</i>	43
Tabla 3. <i>Características del panel seleccionado.</i>	51
Tabla 4. <i>Características del inversor seleccionado.</i>	52
Tabla 5. <i>Pérdidas relacionadas a los paneles fotovoltaicos.</i>	56
Tabla 6. <i>Energía estimada generada mensual.</i>	56
Tabla 7. <i>Toneladas de CO2 reducidas en un año mediante la implementación del proyecto.</i>	60
Tabla 8. <i>Costos estimados de producción del proyecto FV con impuestos.</i>	67
Tabla 9. <i>Costos estimados de producción del proyecto FV sin impuestos.</i>	67
Tabla 10. <i>Tarifa Actual y LCOE.</i>	70

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Metodología de trabajo.</i>	17
Figura 2. <i>Ruta Rionegro - Llano de Palmas.</i>	29
Figura 3. <i>Ubicación del centro poblado de Llano de Palmas, tomado de Google Earth.</i>	30
Figura 4. <i>Intensidad Sísmica Esperada, Rionegro, Santander.</i>	32
Figura 5. <i>Irradiación solar global anual en la zona Llano de Palmas.</i>	35
Figura 6. <i>Diagrama mapa potencial hidroenergético de Colombia.</i>	37
Figura 7. <i>Velocidad anual del viento en Llano de Palmas.</i>	39
Figura 8. <i>Demanda diaria típica usuarios estrato 1.</i>	44
Figura 9. <i>Demanda diaria típica de usuarios estrato 2.</i>	45
Figura 10. <i>Demanda diaria típica de usuarios estrato comercial.</i>	45
Figura 11. <i>Demanda diaria usuarios agregados.</i>	47
Figura 12. <i>Áreas disponibles para la ubicación de los paneles fotovoltaicos.</i>	49
Figura 13. <i>Disposición física de paneles fotovoltaicos.</i>	50
Figura 14. <i>Energía generada por la planta fotovoltaica.</i>	57
Figura 15. <i>Disposición de las fronteras comerciales.</i>	58
Figura 16. <i>Curva horaria de potencia.</i>	61
Figura 17. <i>Curva de energía importada y exportada a la red.</i>	62
Figura 18. <i>Energía entregada a la red, generada, importada y exportada.</i>	63

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Plan De desarrollo de Rionegro.....	78
Apéndice B. Fotografías del centro poblado.....	78
Apéndice C. Análisis de la disponibilidad solar.....	78
Apéndice D. Análisis de la disponibilidad de viento.....	78
Apéndice E. Estudio de ubicación para el sistema de generación.....	78
Apéndice F. Fichas técnicas de los equipos.....	78
Apéndice G. Diagrama unifilar del sistema eléctrico de generación.....	78
Apéndice H. Disposición de Fronteras Comerciales.....	78
Apéndice I. Balance de energía del sistema fotovoltaico.....	78
Apéndice J. Capex del proyecto.....	78
Apéndice K. Informe de prefactibilidad.....	78

Glosario

Acuerdo de París (COP21): tratado internacional sobre cambio climático adoptado en París en 2015, cuyo objetivo principal es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y limitar el aumento de la temperatura global.

Combustibles fósiles: recursos energéticos formados a partir de restos orgánicos como petróleo, gas natural y carbón, utilizados para la generación de energía.

Energías limpias: Fuentes de energía que generan un impacto ambiental mínimo y reducen las emisiones de GEI, como las energías renovables.

Energías renovables: Recursos energéticos naturales e inagotables, como la solar, eólica, hidroeléctrica y biomasa, utilizadas para generar electricidad.

Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE): Recursos energéticos alternativos y sostenibles que no forman parte de los combustibles fósiles tradicionales.

Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER): Variantes de FNCE provenientes de fuentes naturales y sostenibles, como la solar, eólica, hidroeléctrica y biomasa, que pueden ser utilizadas para generar energía.

Gases de Efecto Invernadero (GEI): liberación de gases como el CO₂, metano, óxido nitroso, entre otros, que contribuyen al calentamiento global al limitar el calor en la atmósfera terrestre.

Transición energética: Proceso hacia un sistema energético más sostenible y menos dependiente de combustibles fósiles, optando por fuentes de energía renovable y limpia.

Resumen

Título: Evaluación de alternativas para el suministro energético del corregimiento Llano de Palmas, Santander, empleando fuentes no convencionales de energía renovable¹.

Autor: Cristian Fabian Serna Sánchez, Franklin Duvan Díaz Cadena y Diego Fernando Carreño².

Palabras Clave: UPME, fuente fósil, transición energética, FNCE, CONPES.

Descripción: En la actualidad, según la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), se estima que el 81% de la energía proviene de los combustibles fósiles y el 19% de fuentes renovables, ahora bien, en base a la significativa repercusión ambiental de emplear fuentes fósiles en la generación de energía, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático estableció “agenda 2030 para el desarrollo sostenible”. En esta los estados signatarios se comprometieron a reducir las emisiones de dióxido de carbono equivalente como parte de los esfuerzos globales para abordar el cambio climático.

En respuesta a estos compromisos, el estado colombiano ha implementado directrices a través de los Consejos de Política Económica y Social (CONPES), enfatizando en la Ley 2099 del 2021, conocida como la "Ley de Transición Energética". Esta ley establece pautas políticas y económicas para impulsar el uso de fuentes de energía no convencionales, buscando no solo mitigar el impacto ambiental sino también estimular la recuperación económica del país.

En este contexto, este trabajo de grado se enfoca en la caracterización energética del corregimiento Llano de Palmas, para identificar alternativas de fuentes energéticas que provean de energía eléctrica a la población, priorizando la viabilidad de proyectos que involucren fuentes no convencionales y renovables, como la energía eólica, solar, biomasa y pequeñas centrales hidráulica. Este trabajo de grado se presenta como un paso hacia una transición energética más sostenible y alineada con los compromisos ambientales globales y locales, destacando la importancia de diversificar la matriz energética para reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

¹ Trabajo de grado.

² Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Gabriel Ordóñez Plata. Codirectores: Johan Farith Petit Suarez y Wilmar Morales Rey.

Abstract

Title: Evaluation of alternatives for the energy supply of the Llano de Palmas village, Santander, using non-conventional sources of renewable energy³.

Author(s): Cristian Fabian Serna Sánchez, Franklin Duvan Díaz Cadena y Diego Fernando Carreño⁴.

Key Words: UPME, fossil source, energy transition, FNCE, CONPES.

Description: Currently, according to the Mining-Energy Planning Unit (UPME), it is estimated that 81% of energy comes from fossil fuels, with only 19% from renewable sources. However, considering the significant environmental impact of using fossil fuels in energy generation, the United Nations Framework Convention on Climate Change established the "2030 Agenda for Sustainable Development." Signatory states committed to reducing equivalent carbon dioxide emissions as part of global efforts to address climate change.

In response to these commitments, the Colombian government has implemented guidelines through the Economic and Social Policy Councils (CONPES), with a focus on Law 2099 of 2021, known as the "Energy Transition Law." This law sets political and economic guidelines to promote the use of non-conventional energy sources, aiming not only to mitigate environmental impact but also to stimulate the country's economic recovery.

In this context, this thesis concentrates on the energy characterization of the Llano de Palmas district. Its overarching objective is to identify alternative energy sources to supply electricity to the population, prioritizing the feasibility of projects involving non-conventional and renewable sources such as wind, solar, biomass, and hydraulic energy. This research represents a step toward a more sustainable energy transition aligned with global and local environmental commitments, emphasizing the importance of diversifying the energy matrix to reduce dependence on fossil fuels.

³ Bachelor Thesis.

⁴ Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Gabriel Ordóñez Plata. Codirectores: Johan Farith Petit Suarez y Wilmar Morales Rey.

Introducción

En la actualidad, la búsqueda de fuentes energéticas sostenibles se rige como uno de los pilares fundamentales para el desarrollo económico y la preservación ambiental a nivel mundial. Las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) se presentan como una alternativa viable y esencial en este contexto, ofreciendo recursos energéticos que no solo son amigables con el medio ambiente, sino que también minimizan la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), como el CO₂. Este enfoque, en línea con los objetivos del Acuerdo de París COP21, ha llevado a Colombia a comprometerse a reducir su dependencia de los combustibles fósiles, apuntando a contribuir con un 20% menos de emisiones para el año 2030, basándose en un análisis de las emisiones nacionales de 2010 (Prensa Minambiente 2018).

Este compromiso hacia una transición energética más sostenible plantea un desafío significativo para el sistema energético colombiano. En este contexto, el actual gobierno ha establecido metas ambiciosas, proponiéndose generar 6 GW de energía con fuentes renovables (ANLA, 2023). Para alcanzar este objetivo, se requiere definir estrategias sólidas que impulsen esta transición hacia fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), una transición que no solo busca lo ambientalmente sostenible, sino también lo económicamente viable y socialmente incluyente.

Es en este marco, surge la importancia de explorar las posibilidades de fuentes renovables de energía en las diferentes regiones del país, con el objetivo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, disminuir las emisiones de GEI y mejorar la calidad de vida de las comunidades locales. Este trabajo de grado se centra en el centro poblado de Llano de Palmas, ubicado en el municipio de Rionegro, Santander, proponiéndose evaluar alternativas para su

suministro energético mediante FNCER. El trabajo desarrollado identifica la fuente potencial de generación eléctrica más adecuada para cubrir las necesidades energéticas de la comunidad, abordando aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales.

El trabajo de grado plantea una pregunta clave: ¿Cuáles son las alternativas viables para el suministro energético en el corregimiento de Llano de Palmas, Santander, empleando FNCER? A través de este enfoque, se evalúan las opciones de FNCER disponibles en la región, permitiendo así proponer una solución idónea para suplir las necesidades energéticas locales, considerando criterios específicos y posibles restricciones.

Este análisis examina variables fundamentales como: la ubicación geográfica del corregimiento, la disponibilidad de FNCER, la participación activa de la comunidad, las condiciones ambientales locales, las regulaciones gubernamentales vigentes y los aspectos técnicos de ingeniería. Asimismo, se considera la tarifa actual y proyectada de energía eléctrica, evaluando así la viabilidad económica a largo plazo de las distintas alternativas.

La evaluación de estas variables permite no solo comprender el potencial energético del centro poblado, sino también proponer una solución eficiente y sostenible para su suministro energético. En este proceso, la participación activa de la comunidad juega un rol esencial, pues no solo se busca informar sobre las FNCER, sino también garantizar su inclusión y participación en el proceso de toma de decisiones.

Con el objetivo de brindar una solución integral y sostenible, este estudio se propone como un aporte tanto para la comunidad de Llano de Palmas como para el panorama energético nacional, ofreciendo una perspectiva técnica, económica y social que promueva el desarrollo sostenible y la preservación del medio ambiente local.

Generalidades del trabajo de grado

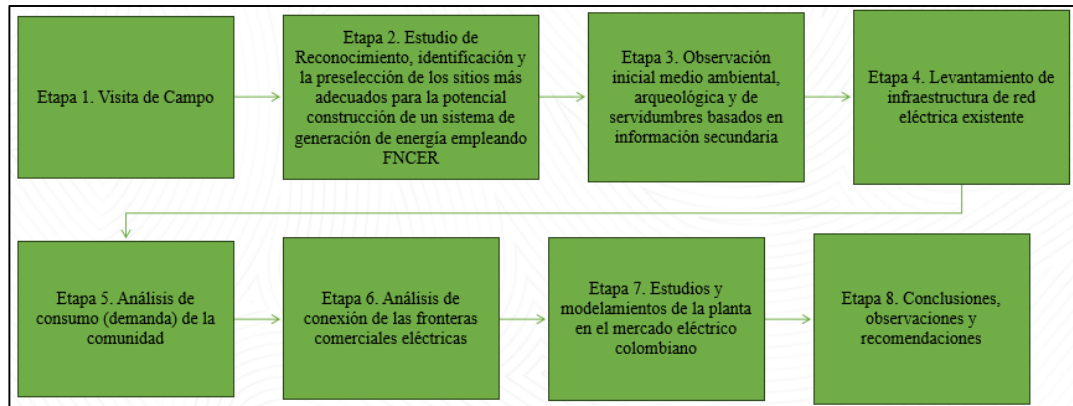
En este apartado, se expone el alcance de la investigación, junto con los objetivos generales y específicos que orienten el desarrollo del trabajo de grado. Se aborda la esencia y propósito del proyecto, delineando claramente las metas a alcanzar.

1.1. Alcance del estudio

Este trabajo de grado realiza un análisis de las diversas fuentes de energía no convencionales existentes en la zona de estudio para brindar una posible solución energética. Es importante señalar que este trabajo no incluye diseños detallados de la planta de generación, en su lugar, se plantean pautas generales para orientar su desarrollo de manera integral. El propósito es el evaluar la viabilidad de desarrollar proyectos que utilicen fuentes de energías renovables no convencionales para la generación de energía eléctrica, con el fin de proveer un suministro sostenible a la comunidad del centro poblado Llano de Palmas.

En este proyecto también se consideraron los siguientes aspectos: 1) La aceptación del proyecto a nivel social por parte de la comunidad, 2) La caracterización energética del centro poblado del Corregimiento Llano de Palmas y 3) El desarrollo de un estudio de prefactibilidad para la creación de una potencial comunidad energética.

De igual forma se planteó la estructura de etapas para el desarrollo de este proyecto de grado, la cual se puede observar en la **Figura 1**.

Figura 1.*Metodología de trabajo.*

Nota: En la imagen se puede observar la metodología llevada a cabo para el desarrollo del proyecto.

1.2. Objetivo general

Evaluar alternativas de suministro energético en el corregimiento Llano de Palmas, Santander, empleando fuentes no convencionales de energía renovable considerando aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales.

1.3. Objetivos específicos

- Identificar las necesidades energéticas específicas de la comunidad, incluyendo los usos domésticos, agrícolas y comerciales.
- Desarrollar un análisis de las alternativas para el suministro energético del centro poblado Llano de Palmas, considerando la disponibilidad de recursos locales sostenibles para la generación de energía eléctrica.

- Realizar un estudio de pre-factibilidad de la alternativa seleccionada que permita el suministro de energía eléctrica al centro poblado Llano de Palmas empleando fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER).

2. Marco referencial

En este capítulo, se exponen definiciones fundamentales que respaldan conceptos claves, apoyándose en estudios previos. Asimismo, se destacan conceptos que ayudarán al lector a identificar aspectos relevantes, facilitando la comprensión de la información presentada en este trabajo de grado.

2.1. Experiencias de otros países empleando fuentes de energía renovables

En el escenario global actual, la tendencia más destacada en el ámbito energético se enfoca en la búsqueda incansable de alternativas a los combustibles fósiles. Este cambio no solo es una necesidad esencial para mitigar el cambio climático, sino también una oportunidad invaluable para transformar la forma en que se obtiene y se utiliza la energía.

El sector de las energías renovables en el marco energético español ha ido en aumento desde el año 2000, año en el cual se hizo público el plan renovable "Plan de Acción Nacional de las Energías Renovables en España, PANER". Adoptado por gobierno español en 1999 y puesto en marcha en el 2000. El potencial de las FNCER es amplio y muy superior a la demanda, puede decirse que las energías renovables son el principal activo energético de España. Siendo el segundo país más importante de Europa, es un referente a nivel mundial en potencia FNCER instalada, gracias a inversiones en investigación, desarrollo e innovación (I + D + i) (Romero, Santos, 2012).

Se indica que la transición de las fuentes fósiles (nucleares) hacia las energías renovables (ER) se está produciendo principalmente debido al aumento de las emisiones de CO₂, la limitación de los recursos fósiles y el aumento en el costo de las importaciones de energía. Además, se destaca la importancia de los resultados económicos vinculados a las ER, como la creación de empleo, la participación global en el mercado de bienes y servicios relacionados con las ER, los ahorros derivados de las importaciones de energía, y la cantidad de emisiones de CO₂ evitadas.

Alemania adoptó en 2000 el Renewable Energy Sources Act (ErneuerbareEnergien-Gesetz, EEG). Antes, en 1990, se había adoptado la Electricity Feed Act la cual dio especial importancia a la generación eólica. Con la EEG se buscó darle un fuerte impulso a las ER eólica, solar, biomasa, geotérmica, hidroeléctrica y gas de mina. Como elemento clave de jalonamiento se obligó a las empresas distribuidoras de energía eléctrica a adquirir prioritariamente la energía inyectada a la red proveniente de ER, y comprarla a una tarifa fija por 20 años (“feed-in tariff”), la cual depende de la tecnología utilizada (y en algunos casos como en la eólica de la localización). A 2007 las tarifas habían sido incrementadas para solar, geotérmica, biomasa buscando crear incentivos para investigación y desarrollo (también se incluyen hidroeléctricas hasta 150 MW) (Corpoema, C. E. 2010).

Por otro lado, el gobierno alemán, reformo la Ley de Energías Renovables, donde se incluye la definición de empresas ciudadanas de la energía como aquellas empresas formadas por al menos 10 personas físicas con derecho al voto, que como mínimo 51% de los votos estén en mano de personas físicas residentes en el distrito administrativo de la ubicación del proyecto, y que ninguno de los accionistas o miembros tengan más del 10% del derecho al voto (Márquez Altemir, F. D. A. 2022).

2.2. Desarrollo de políticas en Colombia para emplear fuentes de energía renovables

La urgencia en Colombia radica en la necesidad de disminuir nuestra dependencia de los combustibles fósiles, que durante mucho tiempo han sido la columna vertebral de nuestras actividades industriales y cotidianas. La sobreexplotación de estos recursos ha llevado a una serie de problemas ambientales, desde la contaminación atmosférica hasta el agotamiento de recursos naturales finitos. En este contexto, la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles y renovables se ha convertido en un objetivo primordial.

La transición energética justa es un enfoque crucial que busca no solo impulsar la adopción de energías renovables y reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), sino también hacerlo de manera equitativa y justa. Este concepto se centra en integrar consideraciones de equidad y justicia en el proceso de cambio hacia una economía con bajas emisiones de GEI. El objetivo principal es asegurar que esta transición no cause perjuicios a los trabajadores y comunidades vulnerables y al mismo tiempo que se aborden las desigualdades históricas en el acceso a la energía y los beneficios económicos relacionados.

La democratización en el ámbito energético no basta solo con abrir el mercado mediante regulaciones adecuadas y financiamiento si no también, se debe incluir nuevos participantes en un contexto justo lo que implica abordar el problema de la desigualdad en el acceso a la información. Por lo general, los debates sobre energía se centran en enfoques técnicos altamente especializados, lo que dificulta la comprensión del ciudadano común. En este sentido, es esencial implementar programas que proporcionen conocimientos generales sobre el sector energético y también promover la capacitación local para impulsar iniciativas de generación con FNCER.

La ley 1715 del 2014 que fue modificada por la ley 2099 de 2021, la cual es el marco legal de las energías renovables en Colombia cuyo objeto es la promoción del desarrollo de las FNCER.

La finalidad de esta ley es establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda, en el marco de la política energética nacional (Congreso de la República de Colombia, 2014).

La Ley 1715 de 2014 definió las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) como 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. Se consideran FNCER las fuentes de energía con generación de: biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos (PCH), la eólica, la geotérmica, la solar y los mares (FNCER, 2023).

2.3. Energía solar

La energía solar fotovoltaica aprovecha la radiación solar transformándola directamente en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, que consiste en la emisión de electrones por un material cuando se le ilumina con radiación electromagnética (en este caso radiación solar).

Existen distintas tecnologías de generación fotovoltaicas, la mayoría se basan en el uso del silicio. La energía solar es un tipo de energía renovable que se puede aprovechar de diversas formas. Una de ellas es la generación de energía eléctrica con la ayuda de paneles solares y del efecto fotovoltaico (IDEA, 2020).

El efecto fotovoltaico se inicia en el momento en el que un fotón impacta con un electrón de la última órbita de un átomo de silicio. Este último electrón se llama electrón de valencia y recibe la energía con la que viajaba el fotón. El fotón es la partícula elemental portadora de todas las

formas de radiación electromagnética incluida la radiación solar. Si la energía que adquiere el electrón supera la fuerza de atracción del núcleo del átomo del silicio (energía de valencia), este sale de su órbita y queda libre. Al quedar libre, el electrón puede viajar a través del material conductor formando una corriente continua. No todos los fotones que llegan a las células solares se convierten en electricidad. Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión (rebota) y otra parte por transmisión (atraviesa la célula) (Planas, 2022).

2.4. Energía eólica

Es la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transmutada en otras formas útiles para las actividades humanas. Principalmente se utiliza para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores. Es un recurso abundante, renovable, limpio y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar termoeléctricas a base de combustibles fósiles, lo que la convierte en un tipo de energía verde. Su principal inconveniente es la intermitencia del viento.

La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

En otras palabras, los vientos son generados a causa del calentamiento no uniforme de la superficie terrestre por parte de la radiación solar, y entre el 1% y 2% de la energía proveniente del sol se convierte en viento. De día, las masas de aire sobre los océanos, los mares y los lagos se mantienen frías con relación a las áreas vecinas situadas sobre las masas continentales. Los continentes absorben una menor cantidad de luz solar, por lo tanto, el aire que se encuentra sobre la tierra se expande, y se hace por lo tanto más liviana y se eleva. El aire más frío y pesado que

proviene de los mares, océanos y grandes lagos se pone en movimiento para ocupar el lugar dejado por el aire caliente (Veracruzana, 2023).

Para poder aprovechar la energía eólica es importante conocer las variaciones diurnas y nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo, la entidad de las ráfagas en espacios de tiempo breves, y los valores máximos ocurridos en series históricas de datos con una duración mínima de 20 años. Es también importante conocer la velocidad máxima del viento. Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que este alcance una velocidad mínima que depende del aerogenerador que se vaya a utilizar pero que suele empezar entre los 3 m/s (10 km/h) y los 4 m/s (14,4 km/h), velocidad llamada «cut-in speed», y que no supere los 25 m/s (90 km/h), velocidad llamada «cut-out speed» (Veracruzana, 2023).

2.5. Energía hidráulica

El agua es una de las fuentes de energía más antiguas utilizadas por el ser humano, fundamental para la vida, la producción de alimentos y la higiene. Y también es el origen de uno de los tipos de energía renovable más extendidos, la energía hidroeléctrica. Según el informe de 2019 de la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA), la capacidad total de las centrales hidroeléctricas en todo el mundo es de 1.172 GW, lo que representa alrededor del 50 % del total de las fuentes de energía renovable (Enel, 2023).

Si bien es la más antigua de todas las energías renovables, con el curso de los años la innovación continua ha conseguido que las centrales hidroeléctricas sean cada vez más eficientes. Gracias a la tecnología actual, alrededor del 90 % de la energía del agua se puede convertir en energía eléctrica, un porcentaje casi tres veces mayor que con las fuentes convencionales.

El bajo impacto medioambiental y la alta eficiencia son dos de los factores que contribuyen a un excelente rendimiento final cuyo resultado es que, de las centrales renovables más grandes del mundo, las cinco primeras por energía producida reciban el impulso de la fuerza del agua (Enel, 2023).

2.6. Biomasa

La biomasa abarca todo un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza. En el contexto energético, el término biomasa se emplea para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o de los productos derivados de ésta. También tienen consideración de biomasa la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU), aunque dadas las características específicas de estos residuos se suelen considerar como un grupo aparte (Fernández, J. 2003).

En cuanto a los usos de la energía producida con biomasa, éstos pueden ser para calefacción, refrigeración y producción de agua caliente en el sector doméstico (viviendas unifamiliares, comunidades de vecinos, barrios o municipios enteros), calor para procesos industriales y generación de electricidad. En resumen, todo el conjunto de fuentes energéticas que comprende la biomasa puede tener tanto aplicaciones térmicas como eléctricas.

La producción de energía eléctrica a partir de la biomasa sólida precisa de sistemas complejos, dado el bajo poder calórico de esta fuente energética, su alto porcentaje de humedad y su gran contenido de volátiles. Para ello se necesitan centrales específicas con grandes calderas, con volúmenes de hogar mayores que si utilizaran combustibles convencionales, que conllevan

inversiones elevadas y reducen su rendimiento. Todo ello, unido a la dificultad de aprovisionamiento de la biomasa, hace que tenga menor peso la biomasa eléctrica que la biomasa para usos térmicos en el cómputo global de esta energía (Cerdá, E. 2012).

2.7. Comunidades Energéticas

Mediante el Decreto 2236 del 22 de diciembre de 2023, el Ministerio de Minas y Energía publicó definió las Comunidades Energéticas como los “grupos organizados de usuarios naturales o jurídicos que pueden asociarse para generar, comercializar y/o usar eficientemente la energía a través del uso de fuentes no convencionales de energía renovable, combustibles renovables y recursos distribuidos” (Ministerio de Minas y Energía, 2023).

El Decreto 2236, además, trae una serie de definiciones y requisitos que deben cumplir las CE para su constitución y operación:

Autogeneración colectiva (AGRC): Actividad realizada por la comunidad energética que produce energía, principalmente, para atender su propia demanda de energía. 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 (Ministerio de Minas y Energía, 2023).

Autogenerador colectivo (AC): Usuarios o potenciales usuarios de servicios energéticos que constituyen una comunidad energética para desarrollar la actividad de autogeneración colectiva (Ministerio de Minas y Energía, 2023).

De acuerdo con lo anterior la actividad de producir energía a cargo de una comunidad energética para atender la demanda de su propia comunidad se conoce como “Autogeneración

colectiva”; por otro lado, la agrupación de los habitantes de una comunidad energética para desarrollar la actividad de autogeneración colectiva, se le llama “Autogenerador colectivo”.

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 microred eléctrica. La entrega de la energía al Sistema de Distribución Local (SDL) se rige bajo la regulación que establezca la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) para tal fin, dentro del plazo de tres (3) meses siguientes a la expedición del decreto (Ministerio de Minas y Energía, 2023).

3. Caracterización del centro poblado del corregimiento de Llano de Palmas

En este capítulo se destacan aspectos significativos del centro poblado de Llano de Palmas, como las vías de acceso, el perímetro que lo delimita y análisis sísmicos de la zona, entre otros elementos. El objetivo es proporcionar un enfoque social que aborde las posibles problemáticas asociadas con el entorno, permitiendo así una comprensión más completa de la realidad del lugar

3.1. Descripción de la zona de estudio

Rionegro, un municipio localizado en el departamento de Santander, se estableció el 5 de mayo de 1805 y en la actualidad alberga a una población de 26 718 habitantes. Este municipio se ha propuesto como meta primordial alcanzar un desarrollo productivo y turístico, capitalizando su posición geográfica y la voluntad de transformación de su población. La clave para materializar esta visión de crecimiento radica en el desarrollo rural y urbano en el territorio municipal. Se busca que este desarrollo se sustente en una comprensión profunda de las interacciones entre los sistemas humanos, los sistemas productivos y los sistemas ambientales, garantizando así la armonía y la

sostenibilidad en el avance de Rionegro. Bajo la jurisdicción de este municipio, emergen diversos centros poblados, siendo Llano de Palmas uno de los destacados. Llano de Palmas se encuentra ubicado en las coordenadas de latitud N 7°14'21.6'' y longitud W 73°11'47.5''.

El centro poblado de Llano de Palmas ha implementado prácticas agrícolas sostenibles con el fin de preservar la calidad del suelo y contribuir a la conservación de la biodiversidad local. La producción de cítricos (mandarinas, limones, piñas y naranjas) y el cacao se ha convertido en una fuente fundamental de ingresos para la comunidad local.

Paralelamente a la actividad agrícola, los habitantes de Llano de Palmas diversifican sus fuentes de ingresos mediante una variedad de emprendimientos locales, tales como establecimientos comerciales, farmacias, panaderías y tiendas de insumos agropecuarios. Estos comercios desempeñan un rol importante en la economía local al proveer los bienes y servicios requeridos por la comunidad.

El turismo ha emergido como una fuente adicional de ingresos para algunos residentes de Llano de Palmas. Las visitas a lugares emblemáticos como la parroquia de Nuestra Señora de Llano de Palmas, la Quinta Casablanca, y la riqueza de la gastronomía local, han atraído a turistas interesados en sumergirse en la cultura y la belleza natural de la región. Esta actividad turística ha impulsado el crecimiento de pequeños negocios.

La Granja Progresos es una entidad dedicada a la producción, distribución y comercialización de carne de pollo y sus derivados, esta granja ha contribuido de manera significativa al progreso económico de la comunidad. Su presencia ha generado empleo y ha incentivado la inversión en el sector avícola, consolidándose como un pilar económico local.

3.2. Descripción de la ruta de acceso al centro poblado Llano de Palmas.

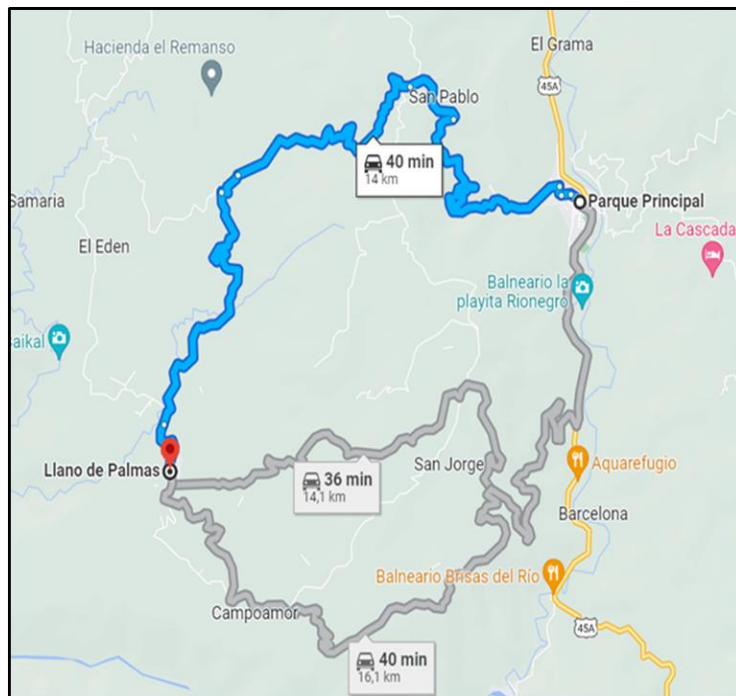
Para llegar al centro poblado de Llano de Palmas desde el parque principal de Rionegro, se debe tomar la ruta indicada en la siguiente figura. Esta ruta se encuentra en la Transversal Oriental, una vía pavimentada que conecta la ciudad de Bucaramanga con Rionegro. Desde el casco urbano de Rionegro, se desprenden carreteras no pavimentadas que llevan a los corregimientos de este municipio.

El recorrido desde el parque principal de Rionegro hasta el parque del centro poblado de Llano de Palmas es de aproximadamente 14 kilómetros y se estima que toma alrededor de 40 minutos. El 10% de la carretera que conecta Rionegro con Llano de Palmas está pavimentada, mientras que el 90% restante es una carretera destapada. Esta vía de acceso permite la entrada de todo tipo de vehículos, como carros, motocicletas, buses y camiones.

La **Figura 2** muestra las diferentes rutas que se pueden tomar desde el parque principal de Rionegro hasta el centro poblado de Llano de Palmas. La ruta que se encuentra en azul fue la que se tomó teniendo en cuenta las condiciones de la vía.

Figura 2.

Ruta Rionegro - Llano de Palmas.



Nota: En la figura se puede apreciar la vía que comunica la zona de llano de Palmas con Rionegro.

La Figura 3 muestra el perímetro que se definió durante el trabajo de campo realizado. La determinación de este perímetro se fundamentó en la proximidad entre los potenciales integrantes de la comunidad. Así mismo en el **Apéndice B** se encuentran las fotografías tomadas en el centro poblado, en las cuales se puede evidenciar el estado en que se encuentra este centro poblado.

La **Figura 3** muestra el área del centro poblado de Llano de Palmas.

Figura 3.

Ubicación del centro poblado de Llano de Palmas, tomado de Google Earth.



Nota: En la figura se puede apreciar el perímetro en el cual se encuentra catalogado el centro poblado de Llano de Palmas.

3.3. Uso del Suelo

Desde una perspectiva urbana, el núcleo poblacional exhibe una disposición heterogénea en su zona urbana. En este entorno conviven tanto viviendas unifamiliares como plurifamiliares, reflejando una estructura residencial diversa. Además de las residencias, se aprecia una variedad de establecimientos comerciales que abarcan desde panaderías hasta tiendas minoristas. Estos negocios locales desempeñan un papel fundamental en el sector económico y social de la comunidad, ofreciendo servicios tanto a residentes como visitantes.

De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio de Río Negro, no se ha establecido una especificación oficial actualizada sobre el uso del suelo en el corregimiento de

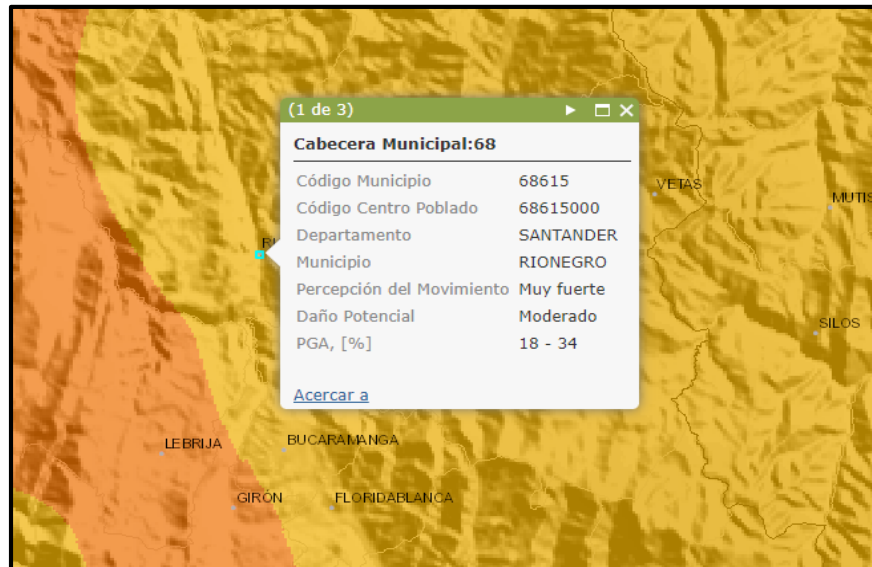
Llano de Palmas. Por lo cual no existe restricciones para la colocación de un sistema fotovoltaico en los techos de las instituciones educativas. El documento que se pudo consultar del municipio de Rio Negro es el plan de desarrollo el cual se encuentra en el **Apéndice A**. En este documento se estipula que Llano de Palmas es un corregimiento del municipio de Rio Negro, igualmente se describe la ubicación y las diferentes instituciones educativas que se encuentran en el centro poblado.

3.4. Riesgos sísmicos e inundaciones

Utilizando el mapa de intensidad sísmica esperada del Servicio Geológico Colombiano, se determinó que la aceleración pico del terreno (PGA) para la zona de Rionegro, Santander se sitúa en un intervalo de riesgo sísmico del 18 al 34%, lo cual se asocia con un potencial de daño moderado y una percepción significativa de riesgo. Asimismo, al analizar el mapa de intensidad sísmica observada, se constata que, en el municipio de Rionegro, los sismos han ocasionado daños de magnitud moderada en las estructuras existentes. Estas observaciones se ilustran en la **Figura 4**.

Figura 4.

Intensidad Sísmica Esperada, Rionegro, Santander.



Nota: En la figura se pueden apreciar las características sísmicas de la zona donde se encuentra localizado el corregimiento de Llano de Palmas.

La recopilación de datos durante la visita de campo confirma la ausencia de inundaciones en el centro poblacional de Llano de Palmas, ya que no se han identificado quebradas o ríos cercanos que puedan dar lugar a posibles situaciones de inundación.

3.5. Identificación de las necesidades energéticas específicas de la comunidad

Teniendo en cuenta la visita realizada al centro poblado Llano de Palmas y gracias a lo comentado por los habitantes, es importante destacar que el centro poblado de Llano de Palmas enfrenta desafíos significativos en cuanto a servicios básicos. No cuenta con un servicio de agua tratada debido al no funcionamiento de la planta de tratamiento de agua potable, lo que afecta la calidad de vida de sus habitantes y la salud pública. Además, no cuenta con un centro de salud para atender las emergencias de los residentes del centro poblado.

Así mismo, la comunidad carece de servicio telefónico por parte de las principales operadoras (Movistar, Tigo y Claro) y tampoco tiene acceso a Internet. Esta falta de comunicación efectiva y oportuna entre los residentes limita el acceso a información vital y oportunidades de conectividad en un mundo cada vez más digital.

A pesar de las dificultades, el centro poblado Llano de Palmas cuenta con una red eléctrica trifásica la cual se encuentra conectada al Sistema Interconectado Nacional (SIN), siendo su fuente de energía la planta de generación Palmas. Sin embargo, la comunidad local ha venido enfrentando un desafío económico adicional debido a los altos costos en sus facturas de energía eléctrica. Este hecho ha despertado la conciencia medioambiental en los habitantes del lugar, quienes han expresado un mayor interés en adoptar fuentes de energía más limpias y sostenibles en sus hogares.

La transición hacia una matriz energética más respetuosa con el medio ambiente es un objetivo compartido por muchos, y Llano de Palmas no es la excepción. A medida que las nuevas tecnologías en energías renovables se desarrollan, la comunidad muestra un interés cada vez mayor en explorar opciones que no solo beneficien su economía, sino que también contribuyan a la preservación del entorno.

El compromiso con el medio ambiente y la búsqueda de soluciones energéticas más sostenibles no solo demuestran la resiliencia de la comunidad de Llano de Palmas, sino que también reflejan una tendencia global hacia un futuro más limpio y sostenible. Con la voluntad y el esfuerzo conjunto, se traza un camino hacia un uso más responsable de la energía, marcando un avance significativo en el desarrollo sostenible de este centro poblado.

4. Análisis de alternativas para el suministro energético

El centro poblado de Llano de Palmas alberga una comunidad que dispone de acceso a diversas fuentes de energía no convencionales, como el agua, el sol, el viento y los residuos orgánicos. No obstante, se debe tener en cuenta que la disponibilidad de estas fuentes también conlleva restricciones para el desarrollo viable de sistemas de generación energética basados en ellas. Con esta premisa, se inicia un análisis de todas las variables vinculadas al aprovechamiento de estas fuentes energéticas. Esto implica la evaluación de factores climáticos y el análisis de datos socioeconómicos obtenidos durante visitas técnicas realizadas en la zona.

Es importante destacar que en esta fase únicamente se evaluará la viabilidad de utilizar los posibles recursos energéticos disponibles en este centro poblado. En capítulos posteriores, se abordará la ubicación de los potenciales sistemas de generación.

4.1. Analisis de disponibilidad del recurso solar

La energía proveniente del sol representa la cúspide de la evolución energética del planeta, siendo esta la principal fuente energética de la humanidad, y encontrada ya sea en forma directa mediante radiación por medio de los rayos solares o de forma indirecta mediante otras presentaciones tal como la biomasa o el viento. Cabe resaltar de igual forma que esta energía solar presenta dos (2) tipos de aprovechamiento, ya sea de forma solar lumínica mediante sistemas fotovoltaicos para generación de energía eléctrica o en forma solar térmica mediante el aprovechamiento de las altas temperaturas para calentar fluidos empleados en diversos procesos.

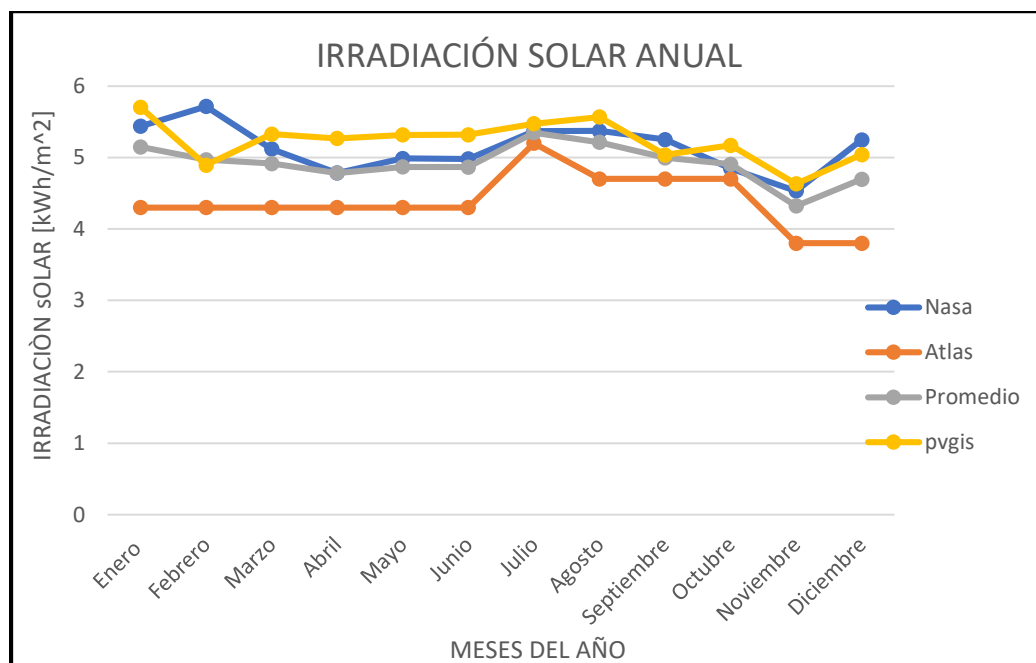
En este trabajo de grado, se resalta la importancia del aprovechamiento de la energía solar lumínica para la generación de energía eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos. Para ello, se emplearon diversas fuentes de información, incluyendo el software Power Data Access Viewer

(NASA, 2023), el software PVGIS (PVGIS, 2023) y el atlas de radiación solar de Colombia proporcionado por la UPME (UPME, ATLAS VELOCIDAD DEL VIENTO DE COLOMBIA, 2023). Estas herramientas se utilizaron para recopilar los datos de irradiación solar entre los años 2018 y 2022, en el centro poblado de Llano de Palmas.

La **Figura 5** muestra el comportamiento anual de la irradiación solar en Llano de Palmas, obtenido de estas fuentes, junto con su correspondiente promedio, identificando así un promedio anual de 4,92 [kWh/m²].

Figura 5.

Irradiación solar global anual en la zona Llano de Palmas.



Nota: En la figura se puede observar el comportamiento estadístico mensual de la irradiación solar en la zona de Llano de Palmas en el transcurso de un (1) año.

Así, queda claro por lo expuesto que existe disponibilidad de este recurso en la zona de Llano de Palmas e igualmente se presentan los cálculos de la disponibilidad solar en el **Apéndice C**, Teniendo en cuenta estos datos, se concluye que la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica utilizando la irradiación solar como fuente, es viable.

4.2. Analisis de disponibilidad del recurso hidráulico

Para el análisis del recurso Hídrico se toma en consideración el estudio del potencial hidroenergético realizado por la UPME (UPME, Atlas de potencial hidroenergético de Colombia, 2023), donde se tiene en cuenta el cálculo del caudal y de las caídas de agua para obtener el potencial por tramo de río con la ayuda de la siguiente ecuación:

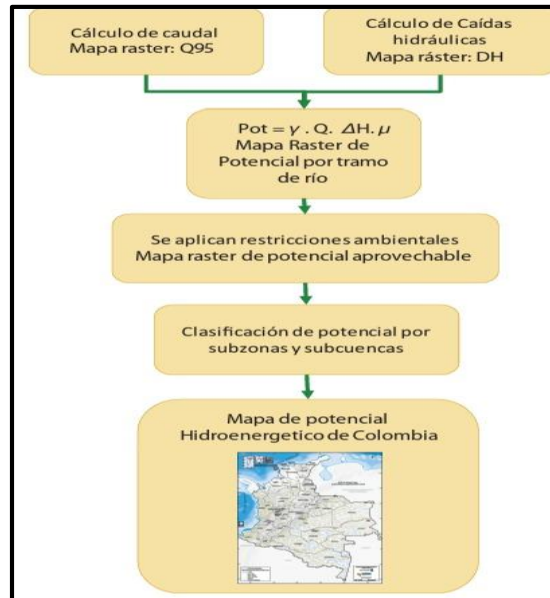
$$\text{Pot} = \gamma \cdot Q \cdot \Delta H \cdot \mu \quad (1)$$

Donde “Pot” es el potencial generado, “ γ ” es el peso específico del agua, “Q” es el caudal que pasa por las turbinas, “ ΔH ” es la caída hidráulica y “ μ ” es la eficiencia del generador. Al final se le aplican las restricciones ambientales (si las hay) y finalmente se clasifica el potencial por subzonas y subcuencas, de esta manera se obtiene el potencial hidroenergético.

En la **Figura 6** se muestra el procedimiento descrito anteriormente en forma de diagrama de flujo.

Figura 6.

Diagrama mapa potencial hidroenergético de Colombia.



Nota: En la figura se puede observar el diagrama de flujo empleado para analizar el potencial hidroenergético en Colombia.

En el centro poblado de Llanos de Palmas, se encuentran dos quebradas, la quebrada Urumo y la quebrada Agua Fría. Esta última constituye la fuente principal de abastecimiento de agua para la comunidad. Es fundamental destacar que ambas quebradas carecen de caída hidráulica (“ ΔH ”) y de caudal (Q), que puedan ser utilizadas para generar energía potencial. Además, debido a la topografía plana del centro poblado, los cuerpos de agua no presentan pendientes pronunciadas, concluyendo así que la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica utilizando recursos hidráulicos como fuente, no es viable.

4.3. Análisis de disponibilidad del recurso de viento

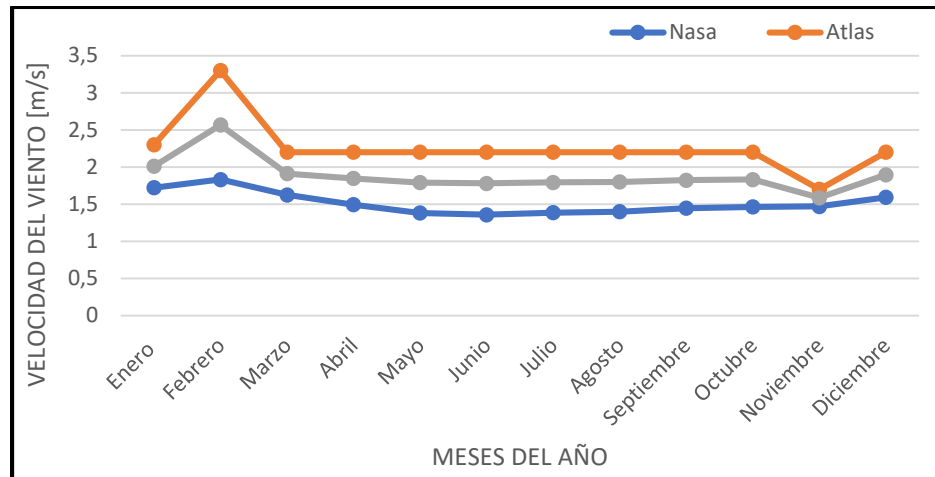
Como bien se puede imaginar el lector, para obtener energía eléctrica mediante sistemas de generación eólicos es vital el contar con un flujo permanente de viento y que además cuente con ciertas condiciones de velocidad mínimas, las cuales tal como en capítulos previos, deben ser analizadas durante un periodo de tiempo mínimo de un año.

De esta forma, a lo largo de este trabajo de grado, se contempló la importancia del aprovechamiento de la energía proveniente del viento, como una fuente con gran potencial para la generación de energía eléctrica mediante sistemas eólicos. Para ello, se emplearon dos fuentes de información: el software Power Data Access Viewer (NASA, 2023) y el atlas del viento en Colombia proporcionado por la UPME (UPME, ATLAS VELOCIDAD DEL VIENTO DE COLOMBIA, 2023). Estas herramientas se utilizaron para recopilar los datos de velocidad del viento entre los años 2018 y 2022 del centro poblado de Llano de Palmas.

La **Figura 7** muestra el comportamiento anual de la velocidad del viento en Llano de Palmas, obtenido de todas estas fuentes, junto con su correspondiente promedio, identificando así un promedio anual de 1,855 [m/s].

Figura 7.

Velocidad anual del viento en Llano de Palmas.



Nota: En la figura se puede observar el comportamiento estadístico mensual de la velocidad del viento en la zona de Llano de Palmas en el transcurso de un (1) año.

Ahora bien, el análisis de los datos recopilados de diversas fuentes indica que, en la zona del centro poblado de Llano de Palmas, la velocidad del viento se sitúa en un rango de 1,5 a 2,5 metros por segundo. Según las pautas establecidas por el centro de investigación de la Universidad Veracruzana mencionadas anteriormente en el marco referencial, dicha velocidad del viento no es suficiente para que la generación de energía eólica sea factible. De hecho, no alcanza el umbral mínimo requerido para aprovechar la energía del viento en la producción de energía eléctrica. en el **Apéndice D** se presentan los cálculos de la disponibilidad eólica

4.4. Análisis de disponibilidad del recurso de biomasa

La energía de la biomasa proviene de materia orgánica de origen vegetal o animal, que puede incluir árboles, plantas, desechos de animales, cultivos, residuos agrícolas, aguas residuales y

estiércol. Este tipo de energía es renovable y sostenible, y se obtiene a través de procesos como la fotosíntesis, en la que las plantas convierten sustancias simples en materia orgánica utilizando la luz solar. La biomasa se divide en varias categorías, que abarcan desde la forestal, agrícola, ganadera, industrial, urbana hasta la acuosa. Puede transformarse en electricidad, combustible y calor mediante diversos métodos, que incluyen procesos físicos, termoquímicos, químicos y biológicos.

La biomasa se posiciona como una alternativa ecológica a los combustibles fósiles, y su disponibilidad es global. Además, constituye una fuente de energía autóctona en muchos lugares del mundo.

En la **Tabla 1**, obtenida de OVACEN (OVACEN, 2022), se detallan los distintos métodos empleados para transformar la biomasa en energía.

Tabla 1.

Tipos de procesos para convertir la biomasa en energía.

Tipos	Método	Descripción	La energía biomasa sirve para
Procesos físicos	Combustión directa	Es el método más utilizado donde se produce una combustión, es la quema (Ejemplo, estufas de leña).	Producir calor. Calentar viviendas y edificios
Conversión termoquímica	Pirolisis y la gasificación	Gasificación: Se transforma la biomasa sólida en un gas sintético o combustible por un proceso de calentamiento a altas temperaturas con inyecciones de cantidades controladas de oxígeno. Pirolisis: Se transforma la materia orgánica por un proceso de calentamiento en ausencia casi total de oxígeno.	Combustibles sólidos, gaseosos y líquidos. Desde generar electricidad o calefacción a carbón vegetal, bioaceite, diésel renovable, metano e hidrógeno.

Conversión química	Por fermentación	Es la conversión del azúcar en ácidos o alcohol con la ayuda de bacterias o levaduras.	Para producir combustibles líquidos, el biodiesel.
Conversión biológica	Digestión anaeróbica	La digestión anaeróbica es una serie de procesos biológicos en los que los microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno.	Para producir combustibles líquidos, el biogás (CO ₂ y CH ₄) y abono líquido. El biogás puede quemarse directamente para cocinar o para producir electricidad.

Nota: En la tabla se proporciona una descripción de los métodos de extracción de energía utilizando biomasa como fuente principal.

En este contexto, la principal actividad agrícola en el centro poblado de Llano de Palmas se enfoca en el cultivo de cítricos, como mandarinas, piñas y naranjas. Alrededor del 90% de la producción agrícola en la región se dedica a estos cultivos. Es relevante señalar que estos cultivos no generan desechos que puedan ser utilizados en la producción de biomasa.

El 10% restante de la actividad agrícola se dedica al cultivo de cacao. Durante la recolección de estos cultivos, se generan desechos, como las cáscaras de cacao. No obstante, es importante destacar que la recolección de estos residuos no se realiza de manera tecnificada. A pesar de que las cáscaras de cacao podrían considerarse como una fuente potencial para la producción de biomasa, la cantidad de residuos generados es limitada debido al tamaño reducido de estos cultivos, lo que restringe su viabilidad para la producción de biomasa.

Por otra parte, en la región, es evidente la existencia de galpones destinados a la cría de pollos para consumo humano. Esta actividad agropecuaria produce desechos, como la pollinaza, que se emplean como fertilizante para los cultivos.

Tras considerar lo mencionado, se concluye que la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica mediante el uso de residuos orgánicos, es decir, la biomasa, no es viable en esta área.

5. Cálculo de la demanda de energía eléctrica

Como todo proyecto en el cual se planea llevar a cabo la construcción de un sistema de generación eléctrica con el propósito de alimentar una carga, se debe realizar un análisis que permitan estimar la demanda total que debe ser suplida por medio de este. Se realiza énfasis en el hecho que la información del presente capítulo fue obtenida por medio de acercamientos con la comunidad llevados a cabo durante el desarrollo del trabajo de grado.

5.1. Caracterización de carga de cada una de las fronteras comerciales eléctricas existentes que incluye perfiles de carga de energía activa y reactiva.

La caracterización de las cargas en cada una de las fronteras comerciales eléctricas existentes, junto con sus respectivos perfiles de carga de energía en el centro poblado Llano de Palmas, se llevó a cabo utilizando las curvas típicas horarias en por unidad (PU) de demanda proporcionadas por la Electrificadora de Santander (ESSA). Dichas curvas corresponden a los perfiles de consumo energético para los estratos 1, 2 y comercial, permitiendo así una evaluación detallada de la demanda de energía en diferentes sectores y estratos del centro poblado.

Esta caracterización se llevó a cabo mediante la recopilación de información durante la visita de campo a la zona, en la cual se seleccionó una muestra de 20 familias. A estas familias se les solicitó la última factura de energía eléctrica emitida por la Electrificadora de Santander. Los detalles de estos recibos se presentan en la **Tabla 2**.

Tabla 2.*Caracterización de la carga de la comunidad Llano de Palmas.*

N°	TIPO	NÚMERO DE PERSONAS	ESTRATO	CONSUMO [kWh/mes]
1	Casa	5	2	179
2	Casa	5	Comercial	498
3	Casa	4	Comercial	166
4	Casa	3	1	5
5	Casa	1	Comercial	225
6	Casa	0	2	2
7	Casa	4	2	71
8	Casa	2	2	130
9	Casa	4	2	434
10	Casa	4	1	517
11	Casa	4	1	125
12	Casa	4	2	296
13	Casa	3	2	98
14	Casa	5	2	88
15	Casa	5	Comercial	36
16	Casa	3	Comercial	34
17	Casa	5	Comercial	514
18	Casa	5	2	176
19	Casa	3	1	58
20	Casa	4	2	42

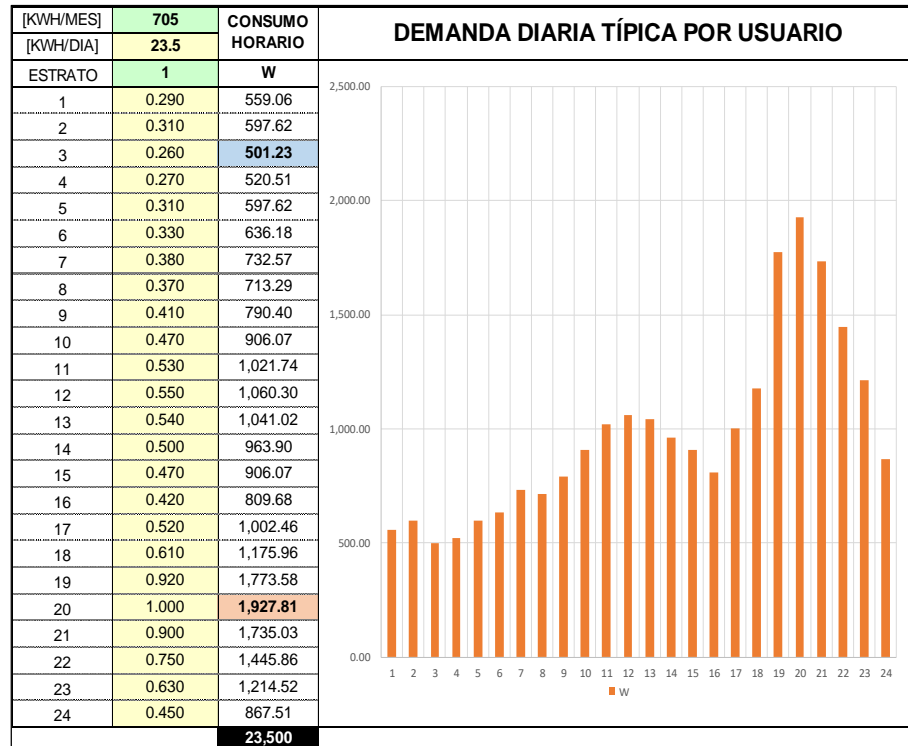
Nota. Esta tabla muestra la información recolectada de la muestra de usuarios seleccionada al momento de realizar el estudio.

Utilizando los consumos registrados en los recibos de energía eléctrica de los habitantes seleccionados en la comunidad, se generaron los perfiles diarios de carga de energía correspondientes a los estratos 1, 2 y comercial; convirtiendo la energía promedio a una curva

estadística horaria diaria. En las **figuras 8, 9 y 10** se exponen los perfiles de carga obtenidos para cada estrato de la comunidad de Llano de Palmas.

Figura 8.

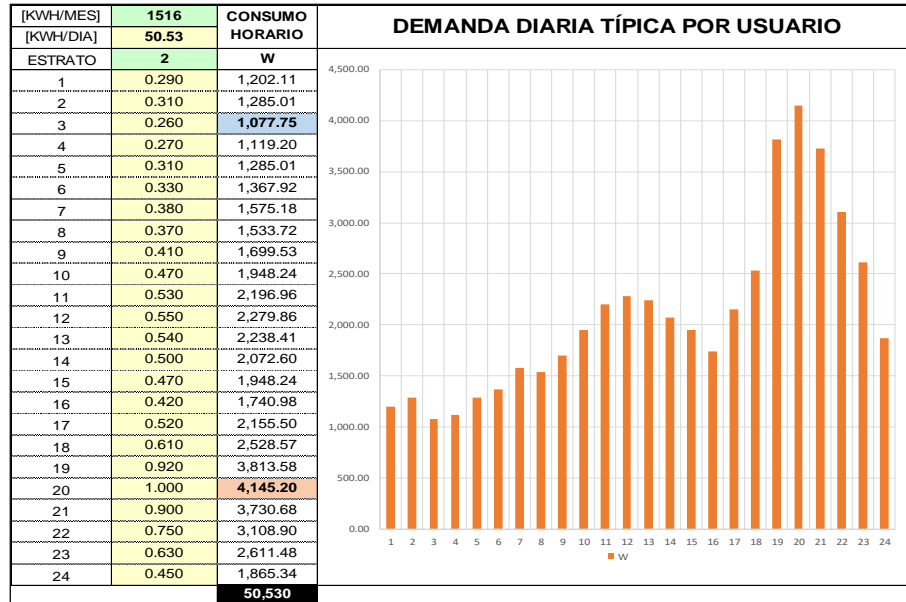
Demanda diaria típica usuarios estrato 1.



Nota. Esta figura muestra el comportamiento de consumo de usuarios estrato 1.

Figura 9.

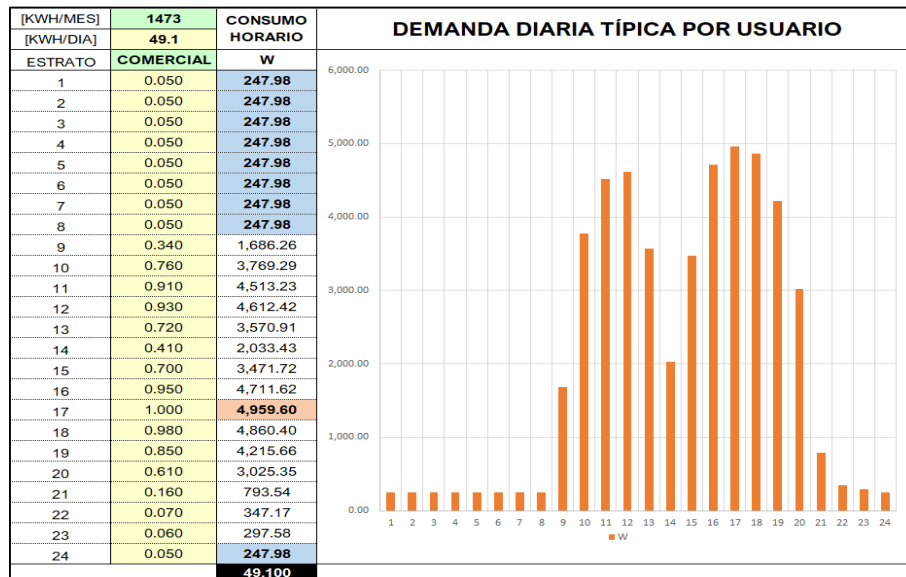
Demanda diaria típica de usuarios estrato 2.



Nota. Esta figura muestra el comportamiento de consumo de usuarios estrato 2.

Figura 10.

Demanda diaria típica de usuarios estrato comercial.



Nota. Esta figura muestra el comportamiento de consumo de usuarios estrato comercial.

5.2. Agregación de la demanda de los participantes de la comunidad energética: consumos individuales y agregados, construcción de la curva de demanda (en potencia y energía, horaria)

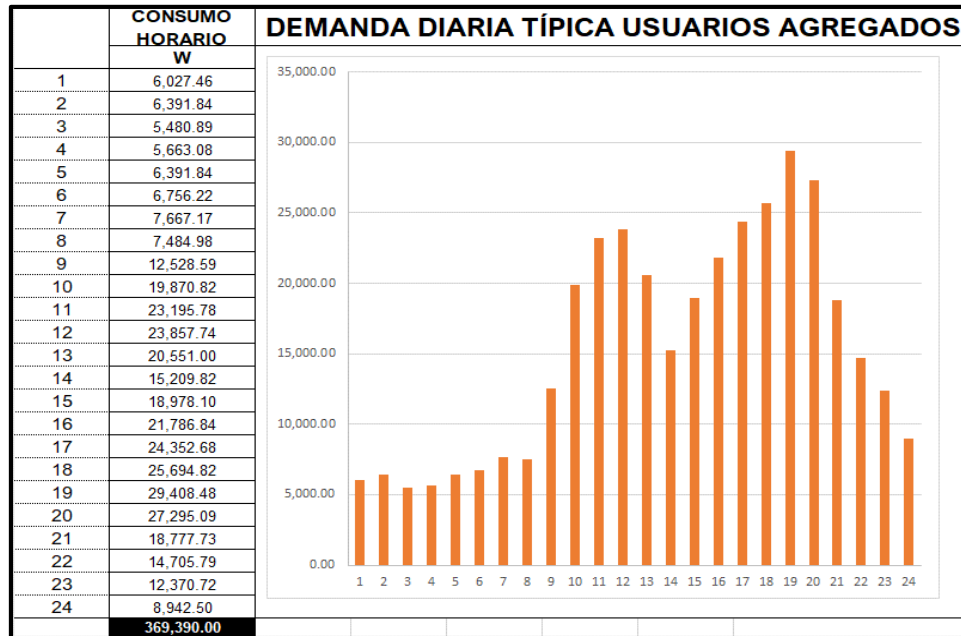
Con el propósito de determinar la demanda total de los participantes de la comunidad, se sumaron las demandas hora a hora de cada estrato (1, 2 y comercial). Posteriormente, al realizar la suma de las demandas hora a hora, se generó el perfil de la demanda agregada para las 20 viviendas del centro poblado Llano de Palmas utilizadas como muestra.

El consumo máximo de energía en una hora para las 20 viviendas es de 9,8 [kW], con un consumo total diario de 123,13 [kW]. En el centro poblado Llano de Palmas, compuesto por aproximadamente 60 viviendas, se utilizó la muestra seleccionada para estimar el consumo diario de toda la comunidad mediante extrapolación de datos. La proyección del consumo diario para las 60 viviendas se sitúa en 369,4 [kW], generando así una demanda total de energía anual aproximada de 134.831 [kWh/año] y una demanda máxima de 29,4 [kW].

En la **Figura 11** se presenta el perfil agrupado de carga con su energía diaria correspondiente para las 60 viviendas.

Figura 11.

Demanda diaria usuarios agregados.



Nota. La figura ilustra el patrón de consumo de energía de todos los usuarios regulados a lo largo de un (1) día en la comunidad de Llano de Palmas.

6. Dimensionamiento del sistema de generación solar

Para el estudio de la prefactibilidad del sistema de generación eléctrica en el corregimiento de Llano de Palmas es necesario realizar el dimensionamiento del sistema de generación en la zona, para lo cual se deben tomar en consideración varios aspectos: técnicos, ambientales, sociales, regulatorios y, por supuesto, la demanda energética que se requiere abastecer. Es así como se plantea un pre-diseño con un nivel de detalle correspondiente a un estudio de prefactibilidad.

6.1. Espacio disponible

La selección de la ubicación propuesta para la generación de energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos se centra en la escuela de Llano de Palmas. En el **Apéndice E** se presenta el análisis realizado de forma detallada. La viabilidad de esta instalación se fundamenta en la posibilidad de utilizar las cubiertas o techos de las aulas de clases como lugar estratégico para los paneles solares. Las aulas de la escuela primaria están mayoritariamente cubiertas con material de tipo Eternit, según se evidencia en la inspección visual. Estas cubiertas presentan un grado de inclinación que oscila aproximadamente entre 5° y 7°. Es relevante señalar que una de las cubiertas de la escuela primaria está compuesta por teja AluZinc.

Se destacan cinco áreas disponibles en la escuela donde podría llevarse a cabo la instalación de los paneles solares para la eventual planta de generación. El área 1 abarca aproximadamente 135 metros cuadrados, el área 2 ocupa alrededor de 220 metros cuadrados, el área 3 comprende unos 100 metros cuadrados, el área 4 tiene una extensión de 100 metros cuadrados, y el área 5 se estima en unos 70 metros cuadrados. Estas medidas son aproximadas y se obtuvieron mediante el uso del software Google Earth. En la **Figura 12** se observan las áreas disponibles para la ubicación de los paneles fotovoltaicos.

Figura 12.

Áreas disponibles para la ubicación de los paneles fotovoltaicos.



Nota: En la figura se puede observar el espacio disponible en la escuela de Llano de Palmas para la instalación física de los paneles fotovoltaicos.

6.2. Disposición física de los paneles fotovoltaicos

Con el objetivo de establecer una planta de generación eficiente, se contempla la asignación de cinco cubiertas específicas dentro de las instalaciones escolares. Estas cubiertas, seleccionadas estratégicamente, presentan un área aproximada total de 625 [m²] que será empleada para la disposición de los paneles fotovoltaicos. En la **Figura 13** se observan estas áreas, en conjunto con la ubicación estratégica de los paneles fotovoltaicos.

Figura 13.

Disposición física de paneles fotovoltaicos.



Nota: En la figura se puede observar la disposición física de los paneles del sistema fotovoltaico.

6.3. Demanda total

La planta de generación fotovoltaica ha sido diseñada con el propósito de suministrar una potencia diaria estimada para abastecer las necesidades energéticas de las 60 viviendas ubicadas en el centro poblado. La potencia diaria del centro poblado se proyecta en 369,4 [kW].

En términos anuales, se estima que la planta deberá suplir una demanda total de energía eléctrica de aproximadamente 134 831 [kWh/año] para las 60 viviendas, con el objetivo de asegurar un suministro constante y confiable a lo largo del año.

6.4. Generación

Para dimensionar la planta de generación, se llevó a cabo el cálculo de diversos parámetros, algunos de los cuales fueron previamente detallados en el documento y otros los cuales se encuentran presentados en apéndices del documento. En este sentido, se precisa que aquellos ya expresados serán únicamente incluidos en conjunto con la referencia al capítulo correspondiente, donde se ha realizado el análisis detallado.

De igual forma se considera esencial el considerar algunos aspectos de los elementos a instalar en conjunto con el sistema de generación.

6.4.1. Paneles fotovoltaicos

Se optó por diseñar el sistema de generación seleccionando un producto disponible actualmente en el mercado. Esta elección se basó en la combinación de parámetros tales como su disponibilidad en el mercado actual, sus características técnicas y su valor, buscando siempre garantizar la viabilidad del proyecto. El producto elegido cumple con las características detalladas se presenta en la **Tabla 3**.

Tabla 3.

Características del panel seleccionado.

MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
Marca	JASOLAR
Referencia	JAM72S30 550/MR
Wp [W]	550
Vmax [V_{DC}]	41,96
Voc [V_{DC}]	49,9
I Max [A_{DC}]	13,11
Isc [A_{DC}]	14
Dimensiones [mm]	2278*1134*30

Nota: En la tabla se presentan las características relevantes de los paneles dispuestos en la prefactibilidad de la planta de generación.

6.4.2. Inversores

Un aspecto fundamental en el funcionamiento de un sistema fotovoltaico es la inclusión de un inversor, un equipo esencial que permite transformar la corriente continua (DC), generada por los paneles solares, en una corriente alterna (AC). Esta última es la forma de energía eléctrica ampliamente utilizada en la mayoría de los sistemas eléctricos para el transporte eficiente de la energía.

Para este diseño, se ha optado por la incorporación de tres inversores de 25 kW, cada uno con 3 puntos de máxima potencia (MPPT). Las características del inversor seleccionado para la planta de generación se presentan en la **Tabla 4**.

Tabla 4.

Características del inversor seleccionado.

INVERSOR	
Marca	Solis
Referencia	S5-GC 3P25-K
Fases operativas	3
$W_{\text{máx in}}$ [W]	37500
$V_{\text{máx in}}$ [Vdc]	1100
Vinicio [Vdc]	180
Rango MPPT [Vdc]	200-1000
No. MPPT/ No. Strings	3 / 6
$I_{\text{máx in por MPPT}}$	32 A / 32 A
W_{out} [W]	25000
V_{out} [VAC]	3/(N)/PE, 220 V
$I_{\text{máx out}}$ [IAC]	41,8
Fr [Hz]	50/60

Nota: En la tabla se presentan las características relevantes de los inversores empleados en la prefactibilidad de la planta de generación.

6.4.3. Arreglos

En lo que respecta a la disposición de los paneles fotovoltaicos, se ha desarrollado un diseño que incorpora 15 paneles conectados en serie en cada String, cada uno equipado con sus correspondientes dispositivos de protección y conductores. Cada una de estas configuraciones se conecta a uno de los 3 puntos de máxima potencia (MPPT) presentes en los inversores. En total, se consideran 3 inversores, lo que permite la implementación de 9 configuraciones, totalizando así 135 paneles. Las fichas técnicas de los elementos empleados en el diseño se encuentran en el **Apéndice F**.

La elección de esta configuración se basó en el cálculo de los 135 paneles, tomando en consideración la demanda eléctrica del centro poblado Llano de Palmas. Este cálculo se guio por la premisa de generar la energía necesaria para satisfacer dicha demanda en un período de 5 horas de sol al día. Este enfoque estratégico garantiza una respuesta efectiva a las necesidades energéticas específicas de la comunidad, optimizando la producción de energía solar.

$$\text{Potencia de la planta} = \frac{\text{Demanda}}{\text{horas sol}} = \frac{369,400 [W]}{5 h} = 73,880 [W] \quad (2)$$

$$\text{Cantidad paneles} = \frac{73,880 W}{550 W} = 134.33 \quad (3)$$

$$\text{Cantidad paneles} = 135 \quad (4)$$

6.4.4. Diagrama unifilar

En el diseño eléctrico de la prefactibilidad del sistema de generación de energía, se realizó la elaboración del diagrama unifilar del sistema eléctrico del centro poblado. Este diagrama proporciona una representación visual de los aspectos constructivos del sistema. Se adjunta a este documento como **Apéndice G**, para comprender la disposición y conexión de los componentes eléctricos.

6.4.5. Estructuras

Para el desarrollo de este diseño, se consideraron los estudios relacionados con la infraestructura existente en las áreas destinadas para la instalación de los paneles solares, componentes esenciales del sistema de generación fotovoltaica. Esto incluye la evaluación de cualquier ajuste necesario para fortalecer la infraestructura existente.

Es importante destacar que, en caso de requerir modificaciones para la adaptación de la infraestructura, los detalles constructivos asociados no se incluyen en este documento. Esto se debe a que el propósito de este informe es proporcionar la información requerida para llevar a cabo una evaluación de prefactibilidad, por consiguiente, los detalles constructivos específicos deberán analizarse en la ingeniería de detalle.

6.4.6. Estudios de sombras

En el proceso de diseñar el sistema fotovoltaico propuesto, se llevó a cabo una visita técnica al sitio, utilizando herramientas específicas para analizar las ventajas y desventajas de la instalación en esta área. En este caso, se empleó el SOLAR PATHFINDER, una herramienta que facilitó la confirmación de la ausencia de estructuras generadoras de sombras en la ubicación

potencial del proyecto, específicamente en la parte superior de la infraestructura de la escuela Llano de Palmas.

6.4.7. Estimación de la producción de energía

Para evaluar la producción de energía eléctrica de la planta de generación fotovoltaica, se consideran varios factores, incluyendo la cantidad de paneles solares, las especificaciones de los módulos fotovoltaicos (dimensiones y eficiencia), así como la eficiencia del inversor y del sistema en su conjunto.

En conjunto con las especificaciones de los paneles solares y los inversores, se requiere emplear el promedio mensual de la irradiación solar obtenida a partir de las fuentes de información utilizadas en la recopilación de datos. Utilizando esta irradiación solar mensual a lo largo del año, se estima la energía generada mensualmente por la planta.

Al calcular la producción de energía de la planta fotovoltaica, se deben considerar las pérdidas de energía eléctrica propias de los paneles solares. Estas pérdidas pueden originarse por diversos factores, incluyendo la irradiancia, la temperatura, las propiedades del módulo, el desajuste en el campo de módulos, las pérdidas óhmicas en el cableado, el plano receptor y el factor de pérdidas por reflexión, llamadas IAM (Incidence Angle Modifier). Estas pérdidas impactan directamente en la producción de energía, generando una reducción aproximada del 16%, y las cuales se encuentran detalladas en la **Tabla 5**.

Tabla 5.

Pérdidas relacionadas a los paneles fotovoltaicos.

PORCENTAJE DE PÉRDIDAS PANELES FOTOVOLTAICOS	
Factor IAM en global	-3.60%
Pérdida FV debido a nivel de irradiancia	-4.20%
Pérdida FV debido a temperatura	-5.30%
Pérdida calidad de módulo	-1.50%
Pérdida mismatch campo de módulo	-1%
Pérdida óhmica del cableado	-1%

Nota: El valor porcentual asociado a las pérdidas se encuentra relacionado a valores obtenidos por el software PVsyst (PVsyst, 2023).

Después de considerar las pérdidas mencionadas y tener en cuenta el promedio de irradiación solar mensual para el centro poblado Llano de Palmas, se realiza una estimación de la producción mensual de energía mediante la planta fotovoltaica, la cual es en promedio de 8349,2 (kWh/Mes). En la **Figura 14** y en la **Tabla 6**, se presenta la producción de energía a lo largo de los 12 meses del año.

Tabla 6.

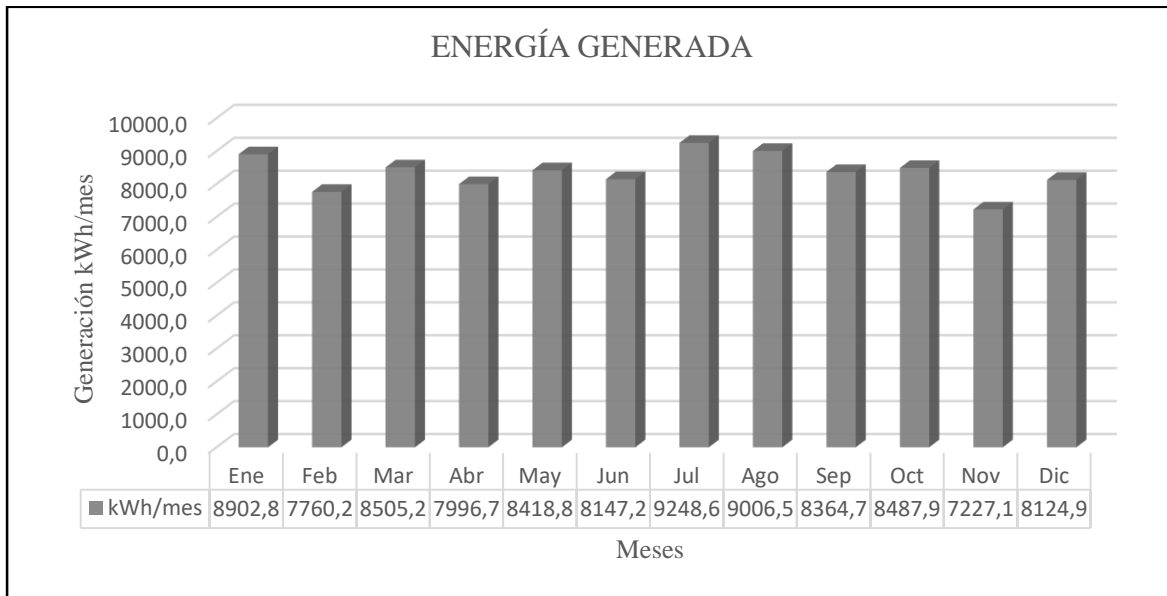
Energía estimada generada mensual.

ENERGIA ESTIMADA GENERADA												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
kWh/mes	8902,8	7760,2	8505,2	7996,7	8418,8	8147,2	9248,6	9006,5	8364,7	8487,9	7227,1	8124,9

Nota: En la tabla se puede apreciar la energía estimada a generar en cada periodo de tiempo a lo largo de un (1) año.

Figura 14.

Energía generada por la planta fotovoltaica.



Nota: En la figura se puede apreciar la energía estimada a generar mes a mes en el transcurso de un (1) año.

La producción total estimada de energía para un año, sumando los valores de los 12 meses, asciende a 100 190,7 [kWh/año] con la planta de generación fotovoltaica. Es importante destacar que la energía mensual estimada se calcula aplicando un factor de seguridad del 10%, con el fin de proporcionar un margen conservador que considera factores como la nubosidad.

El consumo aproximado del centro poblado se sitúa en 132 984 [kWh/año], mientras que la estimación de producción de la planta de generación alcanza los 100 190,7 [kWh/año]. En consecuencia, la planta podrá cubrir aproximadamente el 75,34% de la demanda eléctrica existente. Cabe destacar que no se prevé abastecer el 100% de la demanda, considerando una

reducción del 16% en la producción a causa de pérdidas de eficiencia, junto con un 10% adicional por criterios de diseño.

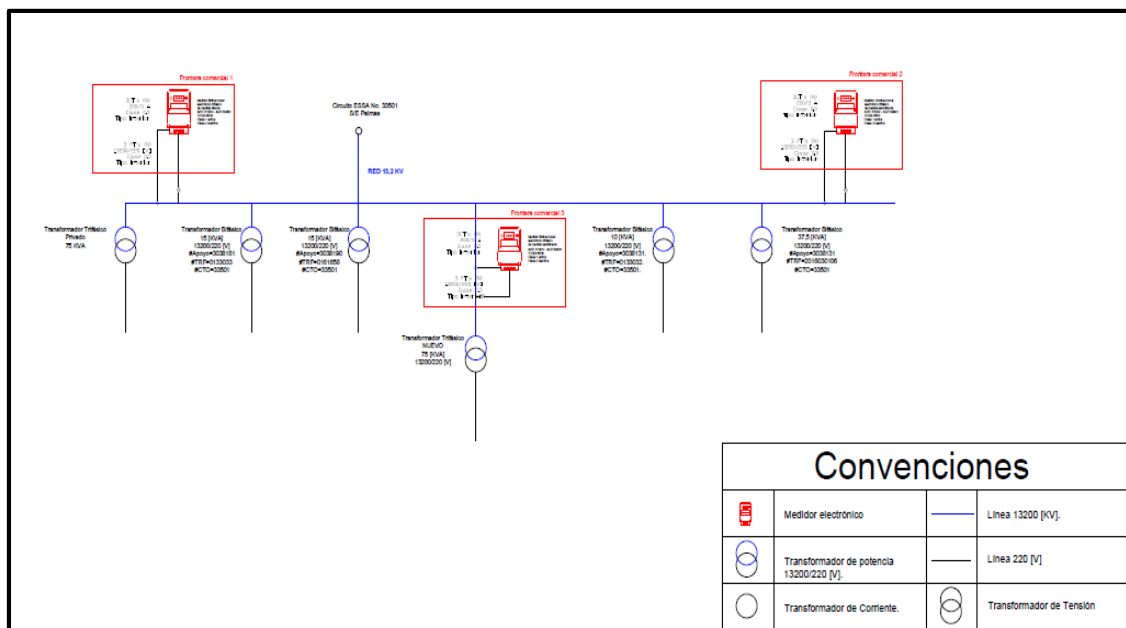
6.5. Propuesta de la posible frontera de comercialización

Establecer una frontera comercial en el punto de entrada del circuito y otra frontera comercial en el punto de salida, donde concluye el circuito que suministra energía al centro poblado Llano de Palmas. Se prevé que esta frontera comercial opere a un nivel de tensión de 2.

En la **Figura 15** se muestra un esquema de la configuración en red de las potenciales fronteras comerciales en la frontera de medición de la planta de generación fotovoltaica e igualmente se presenta este diagrama con detalles en el **Apéndice H**.

Figura 15.

Disposición de las fronteras comerciales.



Nota. Esta figura muestra la disposición de las fronteras comerciales a generar para el desarrollo del proyecto.

Se enfatiza la importancia de que estas fronteras cumplan con todas las regulaciones aplicables, basándose primordialmente en la resolución CREG 038 del 2014 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG, 2014).

6.6. Estimación de la huella de carbono

La huella de carbono es un indicador utilizado para cuantificar la contribución de una actividad al aumento del calentamiento global. Este parámetro ambiental refleja la suma de todas las emisiones de gases de efecto invernadero generados de manera directa o indirecta por un individuo, organización, evento o producto. En términos sencillos, la huella de carbono representa la marca que deja en el medio ambiente cada actividad que emite gases de efecto invernadero.

Para calcular la huella de carbono de una empresa, actividad o individuo es necesario aplicar la siguiente ecuación:

$$gCO_{2eq} = Fe * A \quad (5)$$

Siendo,

gCO_{2eq} : huella de carbono

Fe: factor de emisión

A: actividad

El factor de emisión refleja la cantidad de gramos de CO₂ equivalente generados por una actividad específica. En el contexto de este diseño, que implica una fuente de energía renovable fotovoltaica, este factor se sitúa en 0,504 [t CO_{2eq}/MWh] (UPME, Resolución 320 , 2022). Como se detalla en la **Tabla 7**, la implementación de este proyecto contribuye a la reducción de las emisiones anuales de CO₂ en aproximadamente 50,5 toneladas al año.

Tabla 7.

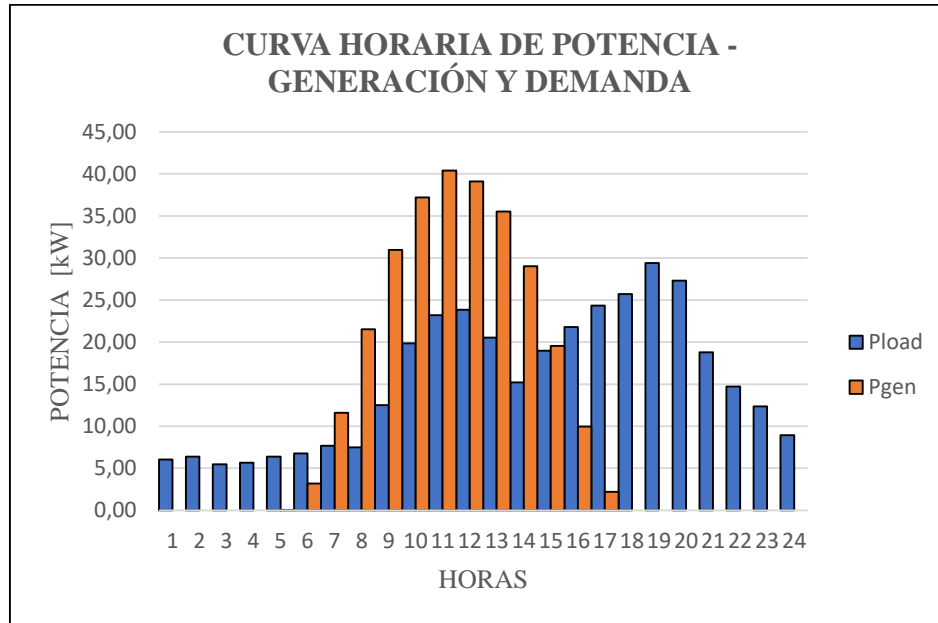
Toneladas de CO₂ reducidas en un año mediante la implementación del proyecto.

Generación Promedio Annual	kWh/Año	100 191
Reducción de emisiones anuales	Toneladas CO ₂ /año	50,5

Nota: En la tabla se puede apreciar la energía estimada a generar a lo largo de un (1) año, junto con el impacto en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

6.7. Simulación del sistema de Autogeneración Colectiva (AGRC)

Durante la simulación del sistema de autogeneración colectiva, se consideraron diversos parámetros clave, incluyendo la demanda diaria del centro poblado Llano de Palmas y la potencia generada diariamente por la planta fotovoltaica, teniendo en cuenta la irradiación solar promedio en la zona de influencia. Asimismo, se exhibe la superposición de las curvas con el fin de facilitar la visualización del balance energético tanto del sistema como de la carga. De este modo, se puede verificar en qué momentos del día se suministra la energía generada y en qué horas se necesita adquirir energía de la red. La representación gráfica de este análisis se muestra en la **Figura 16**.

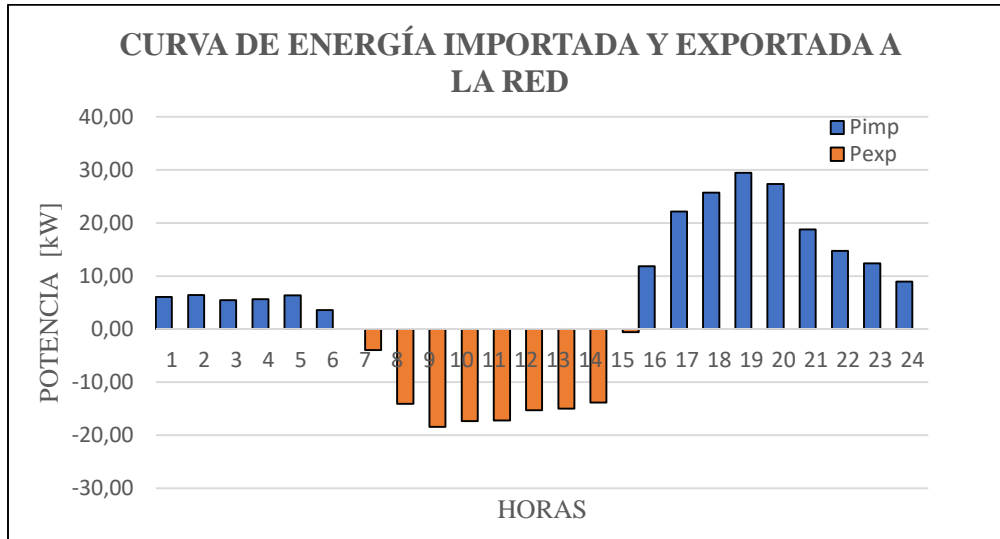
Figura 16.*Curva horaria de potencia.*

Nota: La gráfica representa el comportamiento de la generación de energía eléctrica de la planta, en contraste con el comportamiento de la demanda de la comunidad a lo largo de un (1) día.

Con el objetivo de brindar una mayor interpretación, en la **Figura 17** se puede observar el balance energético horario en el cual opera el sistema de Generación-Demanda. Esto posibilita validar de manera gráfica la cantidad de energía eléctrica que se suministra a la red y, de igual manera, la cantidad energía eléctrica que se requiere de la misma en otros intervalos de tiempo.

Figura 17.

Curva de energía importada y exportada a la red.

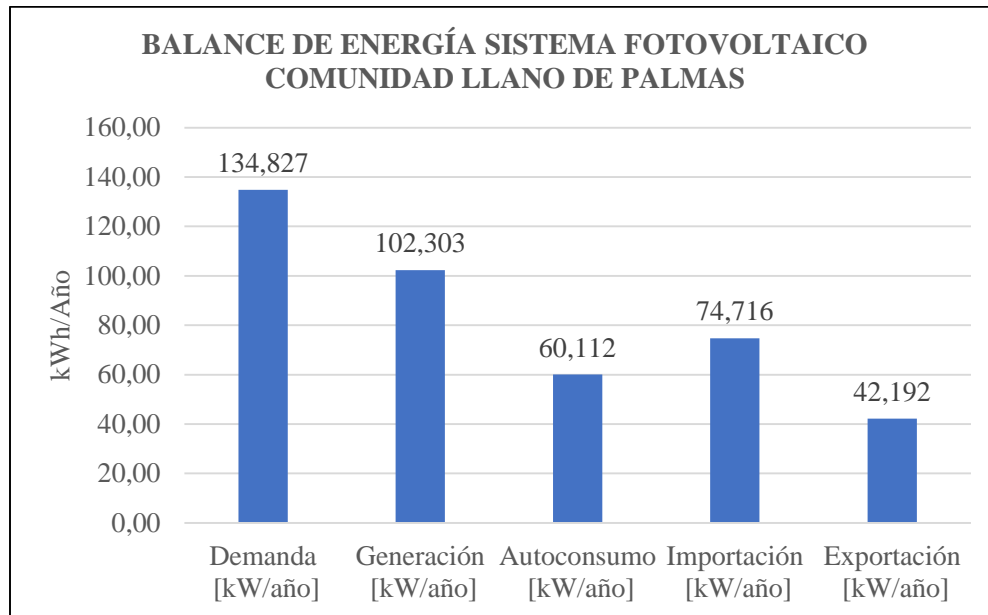


Nota: La gráfica representa el comportamiento horario de la energía importada y exportada en las fronteras comerciales a lo largo de un (1) día.

De igual forma, en la **Figura 18**, se presenta la clasificación de la energía en términos de generación, autoconsumo, importación y exportación al operador de la red local.

Figura 18.

Energía entregada a la red, generada, importada y exportada.



Nota: La figura representa el balance energético de la comunidad incorporando el sistema de generación.

De los 102,303 kWh/Año generado por el sistema fotovoltaico, 60,112 kWh/Año los autoconsume y 42,192 kWh/Año los exporta para ser intercambiados por su equivalente de la importación que suma un total de 74,716 kWh/Año, el costo unitario de intercambiar estos 42,192 kWh/Año es el costo de comercialización de la tarifa actual (por ser una planta menor a 100 kWp de capacidad instalada) y el valor restante que importa 32,524 kWh/Año (Importación Total 74,716 kWh/Año menos la exportación 42,192 kWh/Año) lo deberá pagar a un costo unitario total de la tarifa actual vigente Cu. Los cálculos relacionados a este balance en el **Apéndice I**.

6.8. Análisis económico del proyecto

A continuación, se plantean características con enfoque económico que permiten destacar la viabilidad de desarrollar un proyecto con las características mencionadas, esto considerando estimaciones basadas en el desarrollo de proyectos previos realizados.

6.8.1. Estimación del CAPEX

Para la evaluación de la inversión (CAPEX), se llevó a cabo una consulta con el mercado actual en Bucaramanga en la construcción de sistemas fotovoltaicos, con el que se realizó las estimaciones de los precios de suministro, transporte e instalación. Los elementos considerados para el cálculo del CAPEX son los siguientes:

- Sistema de medida
- Adecuación de tableros eléctricos
- Transformador de conexión
- Circuitos ramales de alimentación
- Elementos de conexión
- SFV On-Grid
- Estructuras metálicas
- Obra civil
- Caracterización de carga
- Inspección y certificación RETIE
- Inscripciones AGPE
- Diseños

La proyección del costo del proyecto indica un gasto directo es decir sin impuestos es de \$386 959 501,00 de pesos colombianos de septiembre de 2023 (según la Tasa Representativa del Mercado de 4 229,00 \$/USD). Para un desglose detallado de cada uno de los elementos mencionados, se puede consultar el **Apéndice J**.

Dado que, es posible que el proceso de contratación del potencial sistema de generación fotovoltaico lo realice un ente del estado, en esta actividad se debe involucrar adicional al valor anterior lo siguiente:

- Administración (incluye impuestos y contribuciones): 32,50%
- Imprevistos: 1%
- Utilidad: 4%

Teniendo en cuenta lo anterior, el total de presupuesto de la planta de generación fotovoltaica es de \$ 505,871,980,00.

Nota: Los gastos administrativos incluyen los impuestos promedio que una entidad estatal suma al costo directo durante un proceso de contratación de proyectos.

6.8.2. Estimación del OPEX

De acuerdo con la investigación realizada por la Universidad del Rosario (RENOVABLES, M. E. E), se ha concluido que el gasto operativo (OPEX) asociado al mantenimiento de sistemas fotovoltaicos de pequeño tamaño, menores a 100 kWp, representa el 1% anual del valor de la inversión (CAPEX). Esta proporción se ha establecido como óptima para preservar la eficiencia y funcionalidad de los sistemas fotovoltaicos a lo largo del tiempo. Es relevante señalar que este 1% anual se ajusta de manera anual en función de la tasa de inflación en Colombia.

$$\text{OPEX}=0,01\times\text{CAPEX} \quad (6)$$

$$\text{OPEX}=0,01\times \$ 505\,871\,980 \quad (7)$$

$$\text{OPEX}=\$5\,058\,719,80 \text{ anual} \quad (8)$$

Cabe resaltar que, establecer una colaboración sólida entre entidades estatales como el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) y las universidades es crucial para ofrecer capacitación a las comunidades. Esta asociación es fundamental para garantizar que las comunidades cuenten con el conocimiento y capacitación necesario en los procesos de mantenimiento y operación de los sistemas de generación fotovoltaico y las redes asociadas para darle sostenibilidad a la infraestructura de las comunidades energéticas.

6.8.3. Costos estimados de producción – LCOE

Para realizar el cálculo de los costos estimados de producción asociados a la implementación del proyecto, es importante determinar el costo promedio total de construcción y operación de una central eléctrica, en este caso, una fuente de generación fotovoltaica. Esta estimación implica dividir los costos totales entre la energía total a ser generada a lo largo de su vida útil, establecida en un período de 20 años.

Como se muestra en la **Tabla 8**, en conjunto con las ecuaciones 9, 10 y 11, se procede a utilizar los datos mencionados para calcular el Costo Nivelado de Energía (LCOE) (Electricidad, 2024) del sistema fotovoltaico.

Tabla 8.

Costos estimados de producción del proyecto FV con impuestos.

COSTOS ESTIMADOS DE PRODUCCIÓN		
CAPEX	505871979,8	\$
FACTOR K	0,0872	
COSTO ANUAL EQUIVALENTE	44104224,4	\$
OPEX	5058719,8	\$
ENERGIA GENERADA	100190,7	kWh/año
LCOE	490,7	\$/kWh
LCOE	0,118	USD/kWh

Nota: La tabla presenta los valores relacionados con el desarrollo económico del sistema de generación fotovoltaica que se planea implementar en la zona de Llano de Palmas asumiendo que este sea otorgado por medio de una licitación pública.

La reducción del Costo Nivelado de Energía (LCOE) se observa al eliminar el porcentaje de impuestos y contribuciones del presupuesto del proyecto (CAPEX). La **Tabla 9** presenta el LCOE con dicha deducción.

Tabla 9.

Costos estimados de producción del proyecto FV sin impuestos.

COSTOS ESTIMADOS DE PRODUCCIÓN		
CAPEX	386959500,8	\$
FACTOR K	0,0872	
COSTO ANUAL EQUIVALENTE	33736892,6	\$
OPEX	3869595,0	\$
ENERGIA GENERADA	100190,7	kWh/año
LCOE	375,3	\$/kWh
LCOE	0,091	USD/kWh

Nota: La tabla presenta valores claves relacionados con el desarrollo económico del sistema de generación fotovoltaica que se planea implementar en la zona de Llano de Palmas asumiendo que este sea construido directamente por la comunidad de la zona de influencia.

Para los cálculos mencionados anteriormente, se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$K = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} \quad (9)$$

$$Inv = K * CAPEX \quad (10)$$

$$LCOE = \frac{Inv + AOM}{E_T} \quad (11)$$

Donde:

K= Factor empleado para calcular el costo anual equivalente del proyecto.

r = Tasa de oportunidad.

n = Vida útil del activo.

CAPEX = Costo inicial de inversión.

LCOE= Coste nivelado de la energía.

Inv = Costo anual equivalente.

AOM = Costos de Administración Operación y Mantenimiento del proyecto (OPEX).

E_T = Energía generada durante 1 año.

Las variables para el cálculo del factor K están basadas por un lado la variable n que hace referencia a la estimación de una vida útil de 20 a 25 años para la mayoría de los componentes de la instalación de una planta de generación fotovoltaica. Es importante señalar que, según el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE, 2013), ciertos elementos eléctricos,

como los cables, requerirán renovación tras un período de funcionamiento de 20 años. En cuanto la variable r que hace referencia a la tasa de interés, se optó por seleccionar un valor del 6%, representativo de la tasa promedio ofrecida por entidades bancarias al momento de otorgar créditos para proyectos similares.

Como se evidencia en el análisis financiero del costo de generación de la planta de energía, se observa que la implementación del proyecto posibilitará la generación de energía a un costo de 0,118 USD/kWh, si la inversión se le asignan impuestos (32,5%) y 0,091 USD/kWh, si la inversión no se le asignan impuestos (32,5%). Asimismo, se resalta que en estas estimaciones no se han considerado los posibles beneficios tributarios asociados con la implementación de este tipo de sistemas de generación.

6.9. Características del sistema fotovoltaico propuesto

El sistema de generación fotovoltaica se propone instalarlo en las cubiertas o techos de las aulas de clase de la escuela de primaria del corregimiento Llano de Palmas, puesto que es una ubicación que no requiere de inversión para comprar el terreno, pero si se requiere realizar un estudio a las estructuras que soportan las cubiertas para definir si estas son aptas o no. Se tiene un área disponible aproximadamente de 625 m² sumando las áreas de las 5 cubiertas de las aulas de clase.

El sistema de generación propuesto para el corregimiento de Llano de Palmas se compone de 136 paneles solares de 550 W para una capacidad instalada de 74,8 kWp y 3 inversores de 25 kW. El sistema de generación será conectado a nivel de tensión 2, con dos fronteras de comercialización con medidores bidireccionales, las cuales se instalarán una al inicio y otra al final del circuito que

suministra la energía eléctrica al centro poblado. Este sistema suministrará el 75,34% de la demanda total del centro poblado de Llano de Palmas.

El sistema de generación se propone como un autogenerador colectivo a cargo de la Junta de Acción Comunal (JAC) del Corregimiento Llano de Palmas, con el propósito de involucrar activamente a la comunidad del centro poblado, de tal manera, que se suministre un porcentaje de la demanda de energía eléctrica de los habitantes y así disminuir los costos de las facturas de energía eléctrica.

El costo nivelado para el sistema de generación solar se calculó teniendo en cuenta el CAPEX, el OPEX, la vida útil del activo y la tasa de oportunidad. Esto permite conocer el precio de la energía eléctrica implementando el sistema de generación fotovoltaico logrando así observar la reducción del costo de la energía eléctrica en comparación con la tarifa que cobra el Operador de Red (OR). En la **Tabla 10** se realiza la comparación del costo nivelado de la energía (LCOE) al generar la energía con la potencial planta de generación fotovoltaica y la tarifa de la energía que pagan los residentes de la comunidad al OR.

Tabla 10. *Tarifa Actual y LCOE.*

COMPARACIÓN TARIFA ACTUAL Y LCOE	
LCOE (\$/kWh) Directo	375,3
LCOE (\$/kWh) Impuestos Contratación	490,7
Tarifa actual (\$/kWh) Sep-23	889,69

Nota: La tabla presenta las tarifas de producción de energía mínimos para mantener el sistema de generación fotovoltaico planteado.

En el **Apéndice K** se describe detalladamente el informe de prefactibilidad realizado para el centro poblado del corregimiento de Llano de Palmas, donde se muestra la caracterización realizada junto con el dimensionamiento de la potencial planta de generación solar.

7. Conclusiones y recomendaciones

En este apartado se exponen las conclusiones del trabajo de grado a partir de los resultados obtenidos durante el desarrollo del mismo. Además, se proponen unas recomendaciones para la implementación futura de comunidades energéticas.

7.1. Conclusiones

Con la realización de este trabajo de grado se evaluaron las alternativas de suministro energético en el corregimiento Llano de Palmas en Santander, para lo cual se identificaron las necesidades energéticas de la comunidad y a partir de ellas se realizó un análisis de las alternativas para el suministro energético con fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER). Este análisis estableció que la mejor alternativa para este centro poblado es un sistema de generación fotovoltaico, al cual se le realizó un estudio de pre-factibilidad.

Se resaltan los siguientes resultados del trabajo de grado:

- La planta de generación fotovoltaica propuesta se concibe como un autogenerador colectivo destinado a cubrir parte de la demanda energética en el centro poblado del corregimiento de Llano de Palmas. Este sistema de generación, con viabilidad para configurarse como una comunidad energética bajo la supervisión de la Junta de Acción Comunal (JAC) del corregimiento, posibilitaría la participación activa

de los habitantes en el proceso de producción de energía eléctrica mediante fuentes renovables. Este enfoque contribuiría a democratizar el acceso a la energía eléctrica, alineándose con los objetivos establecidos en el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 y de esta forma fortalecer a la comunidad para lograr un desarrollo acorde con su entorno y mejorando sus condiciones de vida.

- La caracterización energética realizada corresponde a un estudio de prefactibilidad que comprende el análisis de las diferentes fuentes no convencionales de energía renovable en el centro poblado del corregimiento de Llano de Palmas. Dado que se trata de un estudio de caracterización, se hace necesario profundizar en los detalles técnicos del diseño del sistema de generación fotovoltaico, requiriendo así la realización de una ingeniería de detalle cuando se decida implementar.
- Se ha estimado una capacidad de generación del 75,34% con respecto a la demanda energética actual del centro poblado del Corregimiento de Llano de Palmas, alcanzable mediante la implementación de las propuestas presentadas en este trabajo de grado. Esto se traduce en una potencial planta de generación solar con capacidad de 74,800 Wp, ocupando en su totalidad un área de 625 m².
- Las cubiertas idóneas y disponibles para la futura instalación de una planta de generación solar fueron cuidadosamente seleccionadas. Este proceso de selección se llevó a cabo mediante la evaluación de criterios específicos, los cuales fueron

analizados de manera conjunta con los autores, director y codirectores en el marco de una prefactibilidad del potencial solar.

- Se analizaron los diferentes puntos de conexión para el sistema de generación solar ubicado en las cubiertas de la escuela de primaria, con lo cual se determinó que se deben instalar dos fronteras de comercialización bidireccionales, conectadas a nivel de tensión 2. Es importante resaltar que el diseño de las fronteras de comercialización se debe realizar bajo los lineamientos de la Resolución CREG 038 de 2014.

- La implementación del sistema fotovoltaico en los techos seleccionados posibilitaría una disminución en el consumo de energía eléctrica proporcionada por el operador de red, generando ahorros mensuales y contribuyendo a la reducción de la huella de carbono. Además, esta iniciativa promovería una mayor autosuficiencia en términos energéticos y contribuiría a disminuir la dependencia de la red eléctrica y así tener una mejor confiabilidad del servicio de energía eléctrica.

7.2. Recomendaciones

Este trabajo de grado presenta una caracterización de las necesidades energéticas del centro poblado Llano de Palmas, además de la realización de un estudio de prefactibilidad. En virtud de ello, se recomienda considerar este análisis como el punto de partida para la realización de un estudio de ingeniería de detalle.

La solución propuesta para el suministro energético del corregimiento de Llano de Palmas plantea directrices para la construcción de un sistema de generación fotovoltaico, con el objetivo de abastecer un gran porcentaje de la demanda de energía eléctrica en la comunidad. No obstante, se deben tener en cuenta las particularidades de la infraestructura existente en la zona, lo que implica llevar a cabo posibles renovaciones en infraestructura. Entre estos, se destacan la evaluación de los tejados o estructuras destinadas para la instalación de los paneles solares, el análisis de las redes eléctricas en los puntos de conexión comercial y los puntos de acceso a las áreas que necesitan mantenimiento regular.

Por lo tanto, se sugiere que, previo a la fase de construcción de este sistema de autogeneración colectiva, se lleve a cabo una etapa que incluya estudios tanto de índole infraestructural como social. Esto permitirá asegurar que estos proyectos sean aceptados por la comunidad y sostenibles en el tiempo.

Referencias

Prensa Minambiente (2018). Colombia finaliza el proceso de ratificación del Acuerdo de París frente al cambio climático. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/4013-colombia-finaliza-el-proceso-de-ratificacion-del-acuerdo-de-paris-frente-al-cambio-climatico>

ANLA. (2023). Los proyectos de fuentes no convencionales de energía renovable, prioridad para la ANLA y el país. <https://www.anla.gov.co/noticias-anla/los-proyectos-de-fuentes-no-convencionales-de-energia-renovable-prioridad-para-la-anla-y-el-pais>

Romero, S. R., Santos, A. C., & Gil, M. A. C. (2012). EU plans for renewable energy. An application to the Spanish case. *Renewable Energy*, 43, 322-330.

Corpoema, C. E. (2010). Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE). UPME, Colombia.

Márquez Altemir, F. D. A. (2022). Evaluación de experiencias de Comunidades Energéticas para paliar la pobreza energética.

Congreso de la República de Colombia (2014). Ley 1715 del 13 de mayo de 2014 “Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional”. Bogotá: El Congreso

FNCER. (2023). Fuentes No Convencionales de Energía Renovable <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/fuentes-no-convencionales-de-energ%C3%ADa-renovable-fncer/>

IDAE. (2020). Solar fotovoltaica. <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/solar-fotovoltaica>

Planas. (2015). *¿Qué es el efecto fotovoltaico?* <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/efecto-fotovoltaico>

VERACRUZANA. (2023). Veracruzana, Universidad. *Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables*.

Enel Green Power. (2023). La energía hidroeléctrica. <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-hidroelectrica>

Fernández, J. (2003). Energía de la biomasa. Energías renovables para el desarrollo. Thomson-Paraninfo, 2-20.

Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. Cuadernos económicos de ICE, (83).

Congreso de la República de Colombia (2023). Ley 2294 del 19 de mayo de 2023 “por el cual se expide el plan nacional de desarrollo 2022- 2026 “Colombia potencia mundial de la vida”. Bogotá: El Congreso

Ministerio de Minas y Energía (2023). Ley 2236 del 22 de diciembre de 2023 “Por el cual se adiciona al Decreto 1073 de 2015 con el fin de reglamentar parcialmente el artículo 235 de la Ley 2294 de 2023 del Plan Nacional de Desarrollo 2022 - 2026 en lo relacionado con

NASA, P. (10 de 10 de 2023). *POWER NASA*. Obtenido de NASA: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

PVGIS. (12 de 10 de 2023). *PVGIS*. Obtenido de PVGIS: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR

PVsystem. (25 de 10 de 2023). *PVsystem*. Obtenido de PVsystem: <https://www.pvsystem.com/>

UPME. (12 de 10 de 2023). *ATLAS DE RADICACIÓN SOLAR DE COLOMBIA*. Obtenido de Atlas de radiación solar de Colombia: http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/1-Atlas_Radiacion_Solar.pdf

UPME. (12 de 10 de 2023). *Atlas de potencial hidroenergético de Colombia*. Obtenido de Atlas de potencial hidroenergético de Colombia: <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-en-Colombia.aspx>

UPME. (12 de 10 de 2023). *Atlas de vientos de Colombia*. Obtenido de Atlas de vientos de Colombia: http://www.upme.gov.co/Atlas_Viento.htm

OVACEN. (15 de 10 de 2022). *OVACEN*. Obtenido de OVACEN: <https://ovacen.com/energias-renovables/>

UPME. (2022). Resolución 320 . *UPME*, 3-4.

CREG. (20 de 03 de 2014). *CREG*. Obtenido de Gestor Normativo CREG: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0038_2014.htm

RETIE. (2013). *RETIE*.

Electricidad, S. (02 de 01 de 2024). *Sector Electricidad*. Obtenido de Sector Electricidad: <https://www.sectorelectricidad.com/18564/me-conviene-el-autoconsumo-electrico-que-es-el-lcoe-y-como-calcularlo-por-alex-moreno-bellostes/>

Apéndices

En el contexto del presente proyecto de investigación, se ha llevado a cabo una serie de análisis y cálculos con el propósito de fundamentar y respaldar adecuadamente cada una de las etapas y decisiones adoptadas. Con el fin de proporcionar una documentación detallada y organizada de estos procesos, se presenta a continuación una discriminación de la información recopilada y los cálculos efectuados, estructurados de manera sistemática en los siguientes apéndices:

Apéndice A. Plan De desarrollo de Rionegro.

Apéndice B. Fotografías del centro poblado.

Apéndice C. Análisis de la disponibilidad solar.

Apéndice D. Análisis de la disponibilidad de viento.

Apéndice E. Estudio de ubicación para el sistema de generación.

Apéndice F. Fichas técnicas de los equipos.

Apéndice G. Diagrama unifilar del sistema eléctrico de generación.

Apéndice H. Disposición de Fronteras Comerciales.

Apéndice I. Balance de energía del sistema fotovoltaico.

Apéndice J. Capex del proyecto.

Apéndice K. Informe de prefactibilidad.

Los diversos documentos presentados como apéndices están adjuntos en un archivo en Google Drive, al cual se puede acceder a través del siguiente enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/1b3QIyEpCRjoTAuFyz0wVGfn6CSD-No54?usp=sharing>