



**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE UNA MICRORRED HÍBRIDA CON ENERGÍA
SOLAR FOTOVOLTAICA Y BIOMASA EN EL MUNICIPIO RIONEGRO,
SANTANDER: CASO DE ESTUDIO FINCA “SI DIOS QUIERE”.**

Proyecto de Grado

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
Valeria Victoria Aguilera Gil
Yineth Valentina Vanegas Barbosa

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA MICRORRED HÍBRIDA CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y BIOMASA EN EL MUNICIPIO RIONEGRO, SANTANDER: CASO DE ESTUDIO FINCA “SI DIOS QUIERE”.

Realizado por

Valeria Victoria Aguilera Gil
Yineth Valentina Vanegas Barbosa

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Electrónico



Grupo de Investigación MEM (Modelado-Electrónica-Monitoreo)
Facultad de Ingeniería Electrónica
División de Ingenierías
Mayo 2024

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
UNA MICRORRED HÍBRIDA CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y
BIOMASA EN EL MUNICIPIO RIONEGRO, SANTANDER: CASO DE ESTUDIO
FINCA “SI DIOS QUIERE”.

Realizado por

Valeria Victoria Aguilera Gil
Yineth Valentina Vanegas Barbosa

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Electrónico

Dirigido por

Mtr. Gianina Garrido Silva

Codirigido por

PhD. Harrynson Ramírez Murillo

Grupo de Investigación MEM (Modelado – Electrónica - Monitoreo)

Facultad de Ingeniería Electrónica

División de Ingenierías

Mayo 2024

Autoridades de la Universidad

RECTOR GENERAL

FRAY, ÁLVARO JOSÉ ARANGO RESTREPO, O.P.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO GENERAL

FRAY, HERNÁN YESID RIVERA ROBERTO, O.P.

VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL

FRAY, MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O.P.

SECRETARIO GENERAL

LUCERO GALVIS CANO

DECANO DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

FRAY, JAVIER ANTONIO HINCAPIE ARDILA, O.P.

SECRETARIA DE DIVISIÓN

LUZ PATRICIA ROCHA CAICEDO

DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

CARLOS ANDRÉS TORRES PINZÓN

Nota de aceptación

Firma del director

Firma del codirector

Firma del evaluador

Firma del evaluador

BOGOTÁ D.C. _____ DE 2024

ADVERTENCIA

La Universidad Santo Tomás no se hace responsable de las opiniones y conceptos expresados en el trabajo de grado, solo velará por qué no se publique nada contrario al dogma ni a la moral católica y porque el trabajo no tenga ataques personales y únicamente se vea el anhelo de buscar la verdad científica.

Capítulo III –Art. 46 del Reglamento de la Universidad Santo Tomás.

Agradecimientos

Principalmente damos gracias a Dios por permitirnos culminar este proyecto de manera exitosa, dando cierre a una etapa que nos permitirá tener un nuevo inicio en nuestras vidas.

De igual forma, queremos agradecer a nuestros padres y demás familiares, quienes han aportado en esta formación y crecimiento personal y profesional para el logro de nuestra meta académica.

Así mismo, queremos agradecer a la directora de tesis la docente Gianina Garrido y al codirector el docente Harrynson Ramírez, por el direccionamiento y acompañamiento en el proceso de construcción de nuestro proyecto de grado.

Expresamos un agradecimiento a nuestros amigos y a todas las personas que directa e indirectamente estuvieron involucradas en la culminación de este proyecto.

“La gratitud es el arte de apreciar las pequeñas cosas que hacen grande la vida”
– Rosa Montero-

Contenido

Resumen	VI
Abstract.....	VII
Lista de Figuras.....	VIII
Lista de Tablas	IX
Lista de Graficas	XI
Glosario.....	XII
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del Problema	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
1.3. Justificación.....	5
1.4. Impacto Social.....	7
2. Estado del Arte	8
3. Marco Teórico.....	15
3.1. Densidad de Potencia.	15
3.2. Densidad de Energía.....	15
3.3. Biomasa.	15
3.3.1. Residuos Ganaderos.	15
3.3.2. Biomasa como energía renovable.	16
3.3.3. Biogás.....	18
3.4. Métricas de desempeño.	18
3.4.1. Factor de Capacidad (CF).....	18
3.4.2. Relación de Desempeño (PR).	19
3.4.3. Relación de Producción (Yr).	19
3.5. Normalización y desnormalización de datos.	19
3.6. Clustering.	20
3.6.1. K-means.	20

3.7. Método del codo.....	20
4. Diseño Metodológico.....	22
4.1. Fases.	22
4.1.1. Fase 1: Preprocesamiento de datos.	22
4.1.2. Fase 2: Caracterización del conjunto de datos.	23
4.1.3. Fase 3: Dimensionamiento conceptual del sistema.	23
4.1.4. Fase 4: Evaluación de la prefactibilidad técnica del diseño conceptual de una microrred híbrida.	23
4.1.5. Fase 5: Documentación de la experiencia	24
4.2. Cronograma	24
5. Desarrollo Conceptual y Resultados.....	26
5.1. Fase 1. Preprocesamiento de datos.....	26
5.1.1. Recopilación de datos.....	26
5.1.2. Procesamiento de la información recolectada para el dataset.....	29
5.2. Fase 2: Caracterización del conjunto de datos.	33
5.2.1. Técnica de distribución Clustering para Energía Solar Fotovoltaica.	33
5.2.2. Tratamiento datos Biomasa.	38
5.3. Fase 3: Dimensionamiento conceptual del sistema.	40
5.3.1. Sistema Solar Fotovoltaico.	40
5.3.2. Sistema de Biomasa.	45
5.4. Fase 4. Evaluación de la prefactibilidad técnica del diseño conceptual de una microrred híbrida.....	51
5.4.1. Factor de Capacidad (CF).....	51
5.4.1. Relación de Desempeño (PR).	53
5.4.2. Relación de Producción (Yr).	55
6. Conclusiones.....	57
7. Trabajos futuros.....	59
8. Referencias Bibliográficas	60

Resumen

Contexto: En este documento se desarrolla un estudio de prefactibilidad técnica para la implementación de una microrred híbrida con energía solar fotovoltaica y biomasa en la finca “Si Dios Quiere”, ubicada en el municipio Rionegro, Santander, en este lugar se tienen recursos como: desechos orgánicos y radiación solar, los cuales podrían recibir un tratamiento que permita la generación de biogás y de energía eléctrica enfocado a atender las necesidades que presenta la finca al ser una Zona No Interconectada (ZNI).

Método: Se realiza ciencia de datos, con el propósito de eliminar datos atípicos (Outliers) y encontrar patrones de datos. En el caso de la energía solar fotovoltaica, se aplica la técnica de distribución de agrupamiento por Clustering, y en el caso de la biomasa, se lleva a cabo un proceso de conversión digital/analógico, donde se obtiene una densidad de potencia diaria (DPB) mediante un análisis estadístico de datos adquiridos en pruebas de laboratorio de concentración de metano CH_4 [ppm].

Resultados: Se desarrolla el dimensionamiento conceptual del sistema, teniendo en cuenta el cuadro de cargas de la finca, y se evalúan las métricas de desempeño correspondientes, con el objetivo de evaluar la prefactibilidad del sistema.

Conclusiones: La implementación de la biomasa como fuente de energía eléctrica es novedosa debido a que no se encuentran antecedentes, donde se realice algo similar a la contribución de este trabajo, también se evidencia que las métricas de desempeño permiten establecer la prefactibilidad técnica de la solución energética híbrida propuesta.

Palabras clave: Biomasa, Energía solar fotovoltaica, Zona No Interconectada, Microrred.

Abstract

Context: This document presents a technical pre-feasibility study for the implementation of a hybrid microgrid with photovoltaic solar energy and biomass at the "Si Dios Quiere" farm, located in the municipality of Rionegro, Santander. It considers resources such as organic waste and solar radiation, which could undergo treatment to generate biogas and electricity with the purpose of meeting the needs of the farm, given that it is a Non-Interconnected Zone (NIZ).

Method: Data science is applied to eliminate outliers and find data patterns. For photovoltaic solar energy, the clustering distribution technique is used, and for biomass, data processing is implemented to obtain a daily power density value (DPB) from methane CH_4 data [ppm].

Results: The conceptual sizing of the system is developed, considering the farm's load chart, and the corresponding performance metrics are evaluated to assess the system's pre-feasibility.

Conclusions: The implementation of biomass as a source of electrical energy is innovative since there are no projects similar to what is described in this document. It is also evident that performance metrics can estimate how the hybrid system would operate and whether it is feasible or not.

Keywords: Biomass, Photovoltaic solar energy, Non-Interconnected Zone, Microgrid.

Lista de Figuras

Figura 1. Clasificación de las fuentes de biomasa, Tomado de: [33]	16
Figura 2. Aplicaciones de la biomasa, Tomado de: [33]	17
Figura 3. Esquema del proceso de digestión anaerobia, Tomado de: [33]	18
Figura 4. Diagrama de fases, Tomado de: autores.	22
Figura 5. Datos de Energía Solar Normalizados.	34
Figura 6. Diagrama de bloques sistema solar fotovoltaico.	45
Figura 7. Esquema del biodigestor tubular, Tomado de: autores.	45
Figura 8. Dimensiones de la zanja, Tomado de: [45].	49
Figura 9. Diagrama de bloques sistema de biomasa.	51

Lista de Tablas

Tabla 1. Aportes artículos estado del arte.....	10
Tabla 2.Cronograma de actividades.....	25
Tabla 3. Datos IDEAM - Estación Meteorológica 1.	26
Tabla 4. Datos IDEAM - Estación Meteorológica 2.	27
Tabla 5. Datos IDEAM - Estación Meteorológica 3.	27
Tabla 6. Datos Biomasa día 1.	28
Tabla 7. Cálculo de la tensión, día 1.	29
Tabla 8. Caracterización del sensor, día 1.	31
Tabla 9. Calculo peso molecular del CH ₄	32
Tabla 10. Cálculo de mgCH ₄ /m ³ _Aire, día 1.	33
Tabla 11. Método codo por Inercia.....	35
Tabla 12. Método codo por distorsión.	35
Tabla 13. Coordenadas normalizadas de los centroides.....	36
Tabla 14. Coordenadas desnormalizadas de los centroides.....	37
Tabla 15. Cálculo de la densidad de potencia de Biomasa, día 1.	40
Tabla 16. Cuadro de cargas para Energía solar.....	40
Tabla 17. Características técnicas del panel policristalino.	40
Tabla 18. Especificaciones técnicas regulador de carga solar.	43
Tabla 19. Dimensionamiento de las baterías.	44
Tabla 20. Especificaciones técnicas de la batería.	44
Tabla 21. Dimensionamiento del inversor.	44
Tabla 22. Especificaciones técnicas del inversor.	44
Tabla 23. Tiempo de Retención según la Temperatura, Tomado de [45].	46
Tabla 24. Parámetros según el ancho de rollo, Tomado de [45]	47

Tabla 25. Sección eficaz según el ancho de rollo.	48
Tabla 26. Longitud del biodigestor según el ancho de rollo.	48
Tabla 27. Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor.	49
Tabla 28. Dimensiones de la zanja según el ancho de rollo, Tomado de:[45]	49
Tabla 29. Características técnicas del generador de biogás CC700-MG.....	50
Tabla 30. Cuadro de Cargas para Biomasa.	52

Lista de Graficas

Gráfica 1. Comportamiento del sensor MQ-4, Tomado de: [43]	31
Gráfica 2. Método codo por Inercia.	34
Gráfica 3. Método codo por distorsión.....	35
Gráfica 4. Análisis de Clustering y centroides.	36
Gráfica 5. Curva radiación vs tiempo.	37

Glosario

1. *IDEAM*: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
2. *IPSE*: Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas.
3. *ZNI*: Zonas no Interconectadas.
4. *UPME*: Unidad de Planeación Minero-Energética.
5. *CREG*: Comisión de Regulación de Energía y Gas.
6. *DPB*: Densidad de Potencia de Biomasa.
7. *DEB*: Densidad de Energía de Biomasa.

1. Introducción

En la actualidad el mundo se dirige hacia la transición energética buscando implementar soluciones basadas en energías renovables como la energía solar fotovoltaica y la biomasa, Colombia es un país rico en recursos naturales, agrícolas y forestales, por lo que estas energías no convencionales emergen como una solución prometedora que permitiría a las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia tener acceso a la energía eléctrica; desde la industria y la academia colombiana se están sentando las bases para un futuro energético sostenible mediante el desarrollo de proyectos e investigaciones en esta área [1].

Con ese fin se adelanta el estudio de prefactibilidad técnica para la implementación de una microrred híbrida con energía solar fotovoltaica y biomasa en el municipio Rionegro, Santander: Caso de estudio “Finca Si Dios Quiere”, teniendo en cuenta que en este lugar se tienen recursos como desechos orgánicos e irradiación solar los cuales podrían recibir un tratamiento que permita el uso de estos para la generación de biogás y energía eléctrica.

En primera instancia se identifica el problema presente en la finca, a partir del cual se desarrolla la pregunta problema que lleva a proponer los objetivos necesarios para evaluar la prefactibilidad técnica de la microrred, para ello es necesario llevar a cabo la justificación del problema y el impacto social que puede tener este proyecto.

Seguido a esto se desarrolla un registro de quince proyectos realizados en Colombia que se enfocan en la energía solar fotovoltaica y la biomasa, con el propósito de reconocer el aporte que cada uno de estos documentos pueden generar al estudio de prefactibilidad.

En tercer lugar, se elabora el marco teórico, el cual incluye una explicación detallada de algunos términos utilizados en el desarrollo del proyecto.

Como siguiente etapa se tiene el diseño metodológico conformado por 5 fases, dentro de las cuales en la fase 1 se realiza el preprocesamiento de datos, en la fase 2 se elabora la caracterización del conjunto de datos, en la fase 3 se dimensiona conceptualmente el sistema, en la fase 4 se evalúa la prefactibilidad técnica del diseño conceptual de una microrred híbrida y en la fase 5 se hace la documentación de la experiencia.

En el quinto capítulo se encuentra el desarrollo y los resultados del estudio de prefactibilidad, este se ejecutó cumpliendo con las fases planteadas en el diseño metodológico.

Para finalizar se encuentran las conclusiones obtenidas con la elaboración del proyecto y las posibles propuestas de trabajos futuros que se podrían generar implementando estas fuentes de energía renovables.

1.1. Planteamiento del Problema

El Sector Eléctrico Colombiano centra uno de sus subsectores en el desarrollo de políticas, planificación de sistemas, regulación sectorial y planificación de soluciones energéticas en Zonas no Interconectadas (ZNI), para ello requiere el cumplimiento de algunas funciones por parte de entidades como el Ministerio de Minas y Energías, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG); cabe recalcar que existen otras entidades encargadas de prestar Servicios Públicos a la población y pueden estar relacionadas con la producción, transmisión, distribución, comercialización, entre otras actividades que abarca el suministro de energía eléctrica [2].

En consecuencia, se determinan las Zonas No Interconectadas (ZNI) en conformidad con la Ley N° 143 de 1994, Capítulo II, Artículo 11, establece como ZNI un área geográfica en la que no se prestan servicios públicos de electricidad a través del sistema Interconectado Nacional, y por tanto se propone como objetivo alcanzar el mismo nivel de cobertura energética en todo el país en un periodo menor a 20 años. De igual forma el Gobierno Nacional a través del “*International Council of Environmental Law*” (ICEL), se propone formular un Plan Nacional de Energización en ZNI que debería incluir prioritariamente programas de sustitución de combustibles fósiles [3].

Según el Ministerio de Minas y Energías, más del 97% de los colombianos tienen acceso a servicios eléctricos; sin embargo, es claro que el suministro eléctrico es menor en los departamentos como: Vichada, La Guajira, Amazonas, Guainía, Putumayo y Chocó. Según la revista “La República”, hay alrededor de 400.000 hogares que no cuentan con suministro eléctrico [4].

De acuerdo con “la resolución UPME 520 y 638 de 2007 se establece el nuevo procedimiento relacionado con el Registro de proyectos de generación convencionales y no convencionales y cogeneración de energía eléctrica”, en donde se establecen tres fases a seguir para los proyectos, en la primera fase se exige el estudio de prefactibilidad, en la segunda debe contar con su respectivo estudio de factibilidad y la tercera con diseños técnicos finalizados, en todas estas etapas debe cumplir con los requerimientos establecidos en el artículo 5 de dicha resolución, puesto que este permite la inscripción y registro de los proyectos al Sistema de Información de Generación (SIG) de la UPME para tener un control y seguimiento de los proyectos en función del cumplimiento de los estándares de calidad y seguridad necesarios para su operación [5].

Adicionalmente, según datos de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) el departamento de Santander tiene un potencial energético de 206,13[TJ] de biomasa residual proveniente del sector agrícola [6] agregado a que tiene una irradiación solar promedio mensual de aproximadamente $[4; 4,5] \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$ [7]. Conforme a esto se define como objeto de estudio una Finca llamada “Si Dios Quiere” ubicada en el sector rural de Rionegro Santander sus coordenadas son 7°50’00,04” de latitud norte y 73°43’59.39” de longitud oeste, esta no cuenta con

acceso a los servicios públicos como: gas y energía eléctrica debido a que se encuentra en una Zona No Interconectada.

La actividad comercial de la finca es la ganadería de bovinos entre ellos búfalas y becerros, los cuales generan desechos orgánicos como el estiércol que es arrojado a un humedal causando contaminación en la fuente hídrica, además, de vectores como moscas y a su vez desperdicios, que no permiten que esta agua sea usada para abastecer a los animales, regar los potreros o usarla para el consumo. Así mismo, la digestión gastroentérica y los residuos causados por los bovinos producen metano CH_4 [8], este es un gas de efecto invernadero responsable de más del 25% del calentamiento global, siendo estos desechos una de las fuentes más comunes de metano antropogénico, debido a que las bacterias descomponen la materia orgánica en los vertederos de agua produciendo metano.

De igual forma al encontrarse en esta zona los propietarios de la finca realizan un desplazamiento hasta la vía principal para lograr abastecerse de pipetas de gas, lo cual genera una demanda de tiempo y los pone en riesgo, debido a que el mal estado de las vías y el no tomar las precauciones necesarias para transportar las pipetas puede causar fugas de gases comprimidos, inflamables o tóxicos que pueden generar explosiones, intoxicaciones o daños en el entorno.

A partir de lo mencionado anteriormente, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo evaluar la prefactibilidad técnica para una microrred híbrida a partir de datos de radiación solar y biomasa líquida en el municipio Rionegro, Santander: Caso de estudio Finca “Si Dios Quiere”?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Evaluar la prefactibilidad técnica mediante datos meteorológicos de energía solar fotovoltaica y pruebas de laboratorio de biomasa para el diseño conceptual de una microrred híbrida en el municipio de Rionegro, Santander: Caso de estudio Finca “Si Dios Quiere”.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Realizar el preprocesamiento de datos para características de estudio: temperatura e irradiancia obtenidos de una estación meteorológica, y pH, temperatura y potencial de metanización mediante pruebas de laboratorio, permitiendo así la eliminación de los datos inconsistentes.
2. Caracterizar el conjunto de datos preprocesado haciendo uso de técnicas de Ciencia de Datos para el reconocimiento de patrones energéticos.
3. Dimensionar conceptualmente la microrred híbrida a partir de los recursos energéticos disponibles localmente.
4. Estimar la prefactibilidad técnica del diseño conceptual propuesto de una microrred híbrida mediante las métricas de desempeño.

1.3. Justificación

Entidades como el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE) buscan planificar y promocionar soluciones energéticas para las ZNI, desde hace unos años esta corporación gubernamental se centra en identificar, promover, fomentar, desarrollar e implementar proyectos energéticos para estos sectores sin cobertura; por lo que establece tres tipos de proyectos y el aporte que hace la entidad a cada uno de ellos, como por ejemplo Proyectos Estructurados, en donde se presenta un aporte técnico que permite identificar las zonas de caracterización de usuarios, además los Proyectos evaluados y viabilizados en los que la IPSE realiza un análisis integral e interdisciplinario con el propósito de verificar que dichos proyectos cuenten con los requisitos técnicos, económicos, ambientales y sociales [3].

Por consiguiente, en esta búsqueda de desarrollar e implementar proyectos donde se emplea energías renovables que permitan disminuir el consumo de combustibles fósiles, se lleva a cabo la elaboración de tecnologías basadas en energía solar fotovoltaica, debido a que este es un recurso que se encuentra disponible en toda la superficie del planeta tierra, como en el caso del departamento de la Guajira en donde el 57,08% del sector tiene una irradiación entre $[5,01; 6] \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$, allí se presenta una nubosidad baja durante el año, por lo que se considera que es uno de los departamentos que sobresale para la instalación de sistemas de energía solar fotovoltaica [9].

En relación con el departamento de Santander el grupo chileno Colgener desarrolló un proyecto llamado “Termotasajero” en el cual realizaron la implementación de alrededor de 9.600 paneles solares de la marca JinkoSolar de 545[W] cada uno, este proyecto tuvo una inversión cercana a los 4,2 MUSD, estimando que podría llegar a alimentar eléctricamente a alrededor de 4.000 hogares, teniendo en cuenta que este proyecto tiene una generación anual estimada de 8.000 [MWh] y permite evitar la emisión de alrededor de 185.000 toneladas de CO_2 [10].

Por otra parte, en Colombia realizaron algunos proyectos de generación de energía eléctrica donde se emplea la biomasa, proveniente de caña de azúcar y plátano los cuales generan 19 y 16,5 toneladas al año [11], la biomasa se considera como una fuente de energía renovable para la gasificación, produciendo menos dióxido de carbono CO_2 al ambiente, de igual forma el estiércol generado en la explotación pecuaria supera los 81[Mton] anuales con una capacidad energética de más de $71.000 \left[\frac{TJ}{año} \right]$; recursos que hoy en día no se están aprovechando y que generan contaminación por vertimiento a quebradas, sin embargo cabe resaltar que si se buscara aprovechar este recurso sería un 14,3% del mismo que provendría del sector avícola y porcinos [12].

Dentro de la matriz energética colombiana se comprenden dos ramas: energías renovables que tienen una capacidad instalada de 12,016 [MW] en donde se incluye la biomasa, eólica, hidráulica y solar, mientras que las energías no renovables

ofrecen 5.309,59 [MW] producidos por combustibles fósiles como el carbón y el gas. Cabe resaltar que en Colombia los recursos hídricos se destacan como una de las fuentes de energía sostenible más importante, sin embargo cuando se presentan fenómenos como el del Niño se generan riesgos en los sistemas de las hidroeléctricas, por otra parte y teniendo en cuenta que la matriz energética establece que la energía hidráulica tiene una contribución del 69%, la térmica tiene alrededor del 29% y las energías no convencionales tienen un 2% que corresponde un 1,13% a Biomasa, un 0,13% a Eólica y 0,12% a Solar; se ve la necesidad de aprovechar estos recursos al generar proyectos que contribuyan y lleven a Colombia a la transición energética que necesita; como se mencionó antes se pueden presentar inconvenientes con las hidroeléctricas por lo que estas fuentes de energía no convencionales podrían ser útiles al momento de suplir estos vacíos y de igual forma permitirían tener una mayor cobertura de energía y llegar a los puntos o regiones de Colombia que se categorizan como ZNI [13].

1.4. Impacto Social

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible son un enfoque estratégico que establece 17 medidas para lograr un futuro sostenible para todos, abordando los problemas globales de pobreza, desigualdad, paz y justicia que enfrenta la humanidad diariamente. Este proyecto apunta al objetivo número siete, que busca proporcionar energía asequible, segura, sostenible y moderna para todas las personas, y propone aumentar significativamente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para la prestación del servicio energético [14].

En Colombia, el Plan Nacional de Desarrollo traza el camino hacia la transición energética, que tiene como objetivo promover el uso de hidrógeno, biomasa, geotermia, energía mareomotriz, eólica y solar, así como su ingreso a la matriz de generación eléctrica y a los sistemas de generación de energía. En particular, el artículo 235 exige que las comunidades energéticas participen en la autogeneración y la demanda para la prestación del servicio para así promover el objetivo de poner en operación comercial 2.000 [MW] de capacidad para la producción de energía no convencional a partir de energías renovables, como quedo establecido en las bases del PND [15].

Según el Plan de Desarrollo del Gobierno de Santander, el programa “Siempre consolidación productiva del sector de energía eléctrica” tiene como objetivo implementar un plan que permita ampliar la cobertura de los servicios de energías convencionales y busque alternativas para mejorar la calidad de vida de esta población, teniendo como meta a 2023 atraer la electrificación rural a 4.500 clientes, así como instalar 500 soluciones de electrificación utilizando fuentes de energía alternativas [16].

Finalmente, cabe resaltar que este tipo de estudios de prefactibilidad buscan evaluar la viabilidad técnica de implementar proyectos de energías renovables en Colombia, contribuyendo al desarrollo de investigaciones del Grupo de Modelado, Electrónica y Monitoreo (MEM), que cuenta con distintos campos de estudio que van desde la automatización hasta sistemas de energía eléctrica, en los que utilizan técnicas de análisis de datos y buscan desarrollar soluciones efectivas para satisfacer las necesidades energéticas del país.

2. Estado del Arte

Este apartado se enfoca en examinar y analizar el panorama actual de la energía solar fotovoltaica y la energía empleando biomasa en Colombia, para ello se lleva a cabo una consulta de artículos que tengan como objeto de estudio los dos tipos de energía mencionados anteriormente, esto con el propósito de establecer algunos fundamentos teóricos y de encontrar metodologías de trabajo o temas relacionados que permitan alimentar esta investigación. Para el registro de estos documentos se presenta un resumen de la temática abordada y el aporte que realizan a este estudio.

En el artículo titulado *“What makes Colombia's indigenous peoples adopt microgrids? Social acceptance and financial constraints in renewable energy diffusion”* del autor Ian Granit en el que busca cubrir la falta de opiniones de quienes vendrían siendo los usuarios finales de las microrredes de energías renovables, en este caso los indígenas Wayuu que residen en la Guajira, Colombia y presenta un análisis sobre los facilitadores y las barreras para la difusión de microrredes en una ZNI (Zona rural no interconectada) [17].

C.Granados, et al. En su artículo *“Feasibility analysis for the integration of solar photovoltaic technology to the Colombian residential sector through system dynamics modeling”* llevan a cabo estudios que buscan cubrir las necesidades de la demanda de electricidad de los hogares de Colombia, determinando el costo por unidad de la energía a través del Costo Nivelado de Energía, teniendo en cuenta los estratos socio económicos que hay a nivel Colombia, es decir una clasificación de viviendas usadas para establecer el cobro de las tarifas de los servicios públicos en función del poder adquisitivo de la población [18].

En la búsqueda de identificar el potencial energético de la biomasa, a partir de los residuos de biomasa disponibles en Colombia, además de destacar las posibles aplicaciones del potencial energético obtenido de la biomasa con el propósito de reemplazar las fuentes de energía no sostenibles como los combustibles fósiles, Alexis Sagastume Gutiérrez, et al. Desarrollan el documento llamado *“The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia”* [19].

En el artículo titulado *“The impact of climate change on photovoltaic power potential in Southwestern Colombia”* de los autores Gabriel Narváez, et al. Realizan un estudio acerca de las implicaciones a largo plazo del cambio climático en el potencial de energía fotovoltaica en Nariño, Colombia. Por lo que teniendo en cuenta el Experimento Regional Coordinado de Reducción a escala (CORDEX) evalúan el cambio en el potencial de energía fotovoltaica [20].

Marley Vanegas Chamorro, et al. Muestran la radiación solar directa, difusa y total en departamentos como la Guajira, Magdalena y Cesar, de igual forma presentan datos de variables climáticas entre las cuales se encuentran la temperatura y la

presión, por medio de sensores ubicados en estaciones meteorológicas en su artículo nombrado *“Direct, diffuse and total solar radiation data set in La Guajira, Magdalena and Cesar departments -Colombia”* [21].

En el artículo titulado *“A Diffuse Analysis Based on Analytical Processes to Prioritize Barriers in the Development of Renewable Energy Technologies in Alignment with the United Nations Sustainable Development Goals: Evidence from Guajira/Colombia”* de los autores Christian Manuel Moreno Rocha, et al. Se da a conocer las barreras que tiene Colombia para la generación de tecnologías e implementación de energías renovables dentro de un caso de estudio en específico el cual se trata del departamento de la Guajira [22].

Claudia Patricia Pérez Rodríguez, et al. En su artículo *“Harnessing Residual Biomass as a Renewable Energy Source in Colombia: A Potential Gasification Scenario”* Establecen el potencial energético de la biomasa residual de procesos agrícolas, agroindustriales y forestales en Colombia, donde la gasificación es la tecnología de conversión preferida. Para ello, analizan datos de fuentes primarias y secundarias [23].

En *“Soft computing tool for aiding the integration of hybrid sustainable renewable energy systems, case of Putumayo, Colombia”* se contribuye al desarrollo de una herramienta informática para la integración de sistemas híbridos de energía renovable, la cual consiste en la integración de una subherramienta de pronóstico para evaluar datos cuantitativos y cualitativos, documento realizado por los autores A.M. Rosso Cerón, et al [24].

Por otra parte, en el artículo titulado *“Energy performance assessment of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic modules in the tropical mountain climate: The case for Manizales-Colombia”* de los autores Luis Fernando Mulcué Nieto, et al. Se estudia la integración de sistemas solares fotovoltaicos en Manizales, Colombia, debido a que en este lugar las implementaciones de energías renovables aún se encuentran en etapa temprana, por lo que en este artículo se presentan los resultados de evaluación de desempeño energético de sistemas solares fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos [25].

En el documento llamado *“Simulating the effect of the Pay-as-you-go scheme for solar energy diffusion in Colombian off-grid regions”* de los autores Laura Montoya Duque, et al. Analiza el modelo de negocio Pay-as-you-go (PAYG) para promover la energía solar en las zonas aisladas de Colombia o NIZ (Zonas no Interconectadas), establece una metodología considerando el contexto fuera de la red y desarrolla un modelo de dinámica del sistema para evaluar el efecto de PAYG [26].

En el documento nombrado como *“Hybrid solar PV/Biomass powered energy efficient remote cellular base stations”* de los autores Hossain, Md. Sanwar, et al. Se analiza la viabilidad de sistemas híbridos de suministro basados en energía solar

fotovoltaica y generadores de biomasa para proporcionar energía sostenible a las estaciones base macrocelulares fuera de la red [27].

En el artículo titulado *“Research Facilities for Renewable Energy Management Considering Distributed Generation based on Microgrids”* de los autores Jorge El Mariachet Carreño, et al. Se establece una guía para el diseño de instalaciones de investigación en el campo de la Gestión Energética en Generación Distribuida en Sistemas Eléctricos de Potencia [28].

De acuerdo con el artículo titulado *“Evaluation of the performance of a solar photovoltaic - Biomass gasifier system as electricity supplier”* de los autores Roberto Macías, et al. Se reporta el desarrollo de un mecanismo de generación de energía eléctrica basado en un híbrido solar fotovoltaico y gasificador de biomasa acoplado a un generador de gas de síntesis diseñado para regiones rurales aisladas, no interconectadas de América Central y del Sur [29].

En el documento titulado *“A hybrid energy solution for the sustainable electricity supply of an irrigation system in a rural area of zona bananera, Colombia”* de los autores Juan Camilo Barrera Hernández, et al. Se presenta el diseño y modelado de un sistema energético híbrido que evalúa la conveniencia de utilizar diversas fuentes de generación como energía fotovoltaica, biomasa, generación diesel y conexión a la red eléctrica convencional para el suministro de energía en un sistema de riego ubicado en un campo experimental llamado Palmar de la Sierra, situado en el municipio de Zona Bananera, Magdalena, Colombia [30].

En el artículo llamado *“Sizing of an island microgrid using demand side management strategies”* de los autores Yecid Muñoz, et al. El enfoque principal es evaluar la implementación de una microrred aislada utilizando estrategias de gestión del lado de la demanda (DSM) como una solución para diversificar la matriz energética en áreas rurales remotas [31].

Finalmente, es importante mencionar que la información recolectada permite constatar que tipo de estudios se han realizado en Colombia y hasta donde han llegado, de igual forma se evidencian algunas metodologías usadas para el análisis de datos que permiten establecer las posibles zonas que pueden o no ser aptas para la implementación de sistemas empleando energías renovables.

A continuación, se presenta una tabla que condensa el resumen de los artículos encontrados y el aporte que realizan a la investigación.

Tabla 1. Aportes artículos estado del arte.

Título	Autores	Aporte
What makes Colombia's indigenous peoples adopt microgrids? Social acceptance and financial	Ian Granit	De este artículo se apropia la estimación de microrredes como una posible solución para llegar a los pobres energéticos que se encuentran en las ZNI de Colombia, debido a que permiten la

constraints in renewable energy diffusion [17]		producción de energía limpia descentralizada que no depende de una red centralizada, ofrece a las comunidades e individuos tener un control de su uso de energía y al tiempo mejoran el potencial de desarrollo social.
Feasibility analysis for the integration of solar photovoltaic technology to the Colombian residential sector through system dynamics modeling [18]	C.Granados, et al.	De este documento se observa una recolección de datos anual de cuatro ciudades de Colombia en donde se determina la cantidad de radiación solar de acuerdo con la base de datos de la NASA Power, además presenta un dimensionado para que el sistema fotovoltaico cubra el 100% del cargo de consumo residencial mensual usando un modelo matemático.
The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia [19]	Alexis Sagastume Gutiérrez, et al	De este documento se observa el desarrollo de un inventario de los cultivos y ganadería que se producen en Colombia, y la parte procesada por la agroindustria en donde identifican la materia orgánica residual disponible para aplicaciones energéticas y teniendo esto en cuenta calculan el potencial energético basado en biomasa.
The impact of climate change on photovoltaic power potential in Southwestern Colombia [20]	Gabriel Narváez, et al.	De este artículo se observa la importancia de los modelos climáticos usados para estudiar como los cambios climáticos en la radiación solar, temperatura y velocidad del viento afectarán el potencial energético de Nariño hacia finales de este siglo, notando la importancia de estos estudios como una referencia para la futura implementación de sistemas fotovoltaicos en la región.
Direct, diffuse and total solar radiation data set in La Guajira, Magdalena and	Marley Vanegas Chamorro, et al.	De este artículo se observan las mediciones climáticas obtenidas de las estaciones ubicadas en los departamentos de la Guajira, el Cesar y Magdalena, los cuales se

Cesar departments - Colombia [21]		obtuvieron realizando el promedio diario de cada estación, a partir de los que se calculan los datos de radiación solar directa, difusa y total.
A Diffuse Analysis Based on Analytical Processes to Prioritize Barriers in the Development of Renewable Energy Technologies in Alignment with the United Nations Sustainable Development Goals: Evidence from Guajira/Colombia [22]	Christian Manuel Moreno Rocha, et al.	Dentro de esta investigación se hace uso de un tratamiento de datos entre los años 2010 a 2019 para lograr obtener el peso de prioridad y la jerarquía entre estas barreras con el manejo del método de decisión FAHP y un análisis de sensibilidad.
Harnessing Residual Biomass as a Renewable Energy Source in Colombia: A Potential Gasification Scenario [23]	Claudia Patricia Pérez Rodríguez, et al.	Según este estudio, se estimó el potencial tecnológico de biomasa del país (204,8-235,3 PJ), teniendo en cuenta los niveles de biomasa actualmente no utilizados y evaluando los requisitos logísticos y regulatorios del proceso de gasificación, teniendo en cuenta los picos y valles de producción en el país. Si toda la biomasa se procesa así en una planta de gasificación (eficiencia de 22,2-24,0%), como se sugiere en este estudio, la capacidad unitaria estará entre [1.696,7 – 2.111,3] MW con una utilización de la planta del 85%.
Soft computing tool for aiding the integration of hybrid sustainable energy systems, case of Putumayo, Colombia [24]	A.M. Rosso Cerón, et al.	El manejo de estos datos del estudio son la entrada para un modelo de decisión fuzzy multiobjetivo desarrollado en GAMS, donde el valor actual total y las emisiones de CO ₂ del sistema se minimizan para obtener un conjunto de alternativas de Pareto. Estas alternativas se utilizan como entrada para un modelo difuso de

		múltiples atributos desarrollado en MATLAB.
Energy performance assessment of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic modules in the tropical mountain climate: The case for Manizales-Colombia [25]	Luis Fernando Mulcué Nieto, et al.	De este documento se toma en cuenta, que las variables de prueba fueron la temperatura ambiente, la del módulo fotovoltaico, la radiación solar, entre otros, dichos datos se tomaron cada 10 minutos para cada una de las variables, determinando que Manizales cuenta con condiciones climáticas favorables para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos.
Simulating the effect of the Pay-as-you-go scheme for solar energy diffusion in Colombian off-grid regions [26]	Laura Montoya Duque, et al.	En este artículo presentan la metodología PAYG para el contexto colombiano, junto con las implicaciones ligadas para la implementación de la tecnología solar en NIZ.
Hybrid solar PV/Biomass powered energy efficient remote cellular base stations [27]	Hossain, Md. Sanwar, et al.	Dentro de este análisis se hace uso de un software de optimización del modelo de optimización híbrido para energías renovables eléctricas (HOMER) en una amplia gama de configuraciones de red, además de la evaluación de la red inalámbrica usando simulaciones de Monte Carlo basadas en Matlab en términos de métricas de rendimiento como el rendimiento y la eficiencia energética, teniendo en cuenta el perfil de tráfico dinámico.
Research Facilities for Renewable Energy Management Considering Distributed Generation based on Microgrids [28]	Jorge El Mariachet Carreño, et al.	Este artículo ofrece una breve reseña de la Arquitectura del control Jerárquico de Microrredes para seguir analizando las tendencias futuras en la investigación sobre Generación Distribuida basada en Microrredes.
Evaluation of the performance of a solar photovoltaic - Biomass gasifier	Roberto Macías, et al.	De este documento se demuestra la viabilidad de los sistemas híbridos en áreas no

system as electricity supplier [29]		interconectadas con la combinación de un módulo de gasificación de biomasa acoplado a un motogenerador de 30 [kWe] y un sistema solar fotovoltaico de 5 [kWe] con sistemas de almacenamiento en baterías.
A hybrid energy solution for the sustainable electricity supply of an irrigation system in a rural area of zona bananera, Colombia [30]	Juan Camilo Barrera Hernandez, et al.	De este documento se toma en cuenta el software Homer Pro con el cual se realizó el dimensionamiento del sistema y se evaluaron los aspectos económicos y ambientales de los escenarios estudiados.
Sizing of an island microgrid using demand side management strategies [31]	Yecid Muñoz, et al.	En este artículo se manejan estrategias como la eficiencia energética (EE) y la respuesta a la demanda para el cambio de carga (LS), además el software HOMER se utiliza para optimizar y seleccionar la configuración de microrred más conveniente desde una perspectiva económica y ambiental.

3. Marco Teórico

La energía solar fotovoltaica y la biomasa son una estrategia prometedora para abordar los desafíos energéticos y ambientales presentes en la actualidad [1]. Este marco teórico proporciona una base conceptual en relación con estas fuentes de energía renovables, con el propósito de establecer una contextualización de los términos fundamentales a tratar en este documento.

3.1. Densidad de Potencia.

La densidad de potencia es la potencia que pasa por un área normal en dirección a la propagación, es expresada en $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ y representa la potencia radiante que incide perpendicularmente a una superficie [32].

3.2. Densidad de Energía.

La densidad de energía representa la cantidad de energía existente en un sistema o en una región del espacio por unidad de volumen en un punto, en las aplicaciones de almacenamiento cuanto mayor sea esta densidad de energía, más energía habrá disponible para acumular o transportar por volumen o por masa, así mismo se determina la densidad de energía como la energía específica de un sistema de almacenamiento energético, se mide en $\left[\frac{Wh}{m^3}\right]$ [33].

3.3. Biomasa.

Se refiere a recursos biológicos de origen vegetal o animal; como se puede ver en la figura 1, la biomasa primaria es vegetal y puede ser transformada por otros seres vivos que se nutren de ella y generan biomasa animal, biomasa de los residuos animales o también conocida como biomasa secundaria. [34]

3.3.1. Residuos Ganaderos.

Estos residuos están conformados por subproductos generados por animales vivos, como lo es el estiércol o por animales muertos como los huesos o los pellejos, entre otros. Estos subproductos son biodegradables y se pueden descomponer para la generación de biogás, además de constituir una gran parte de la biomasa animal [34].

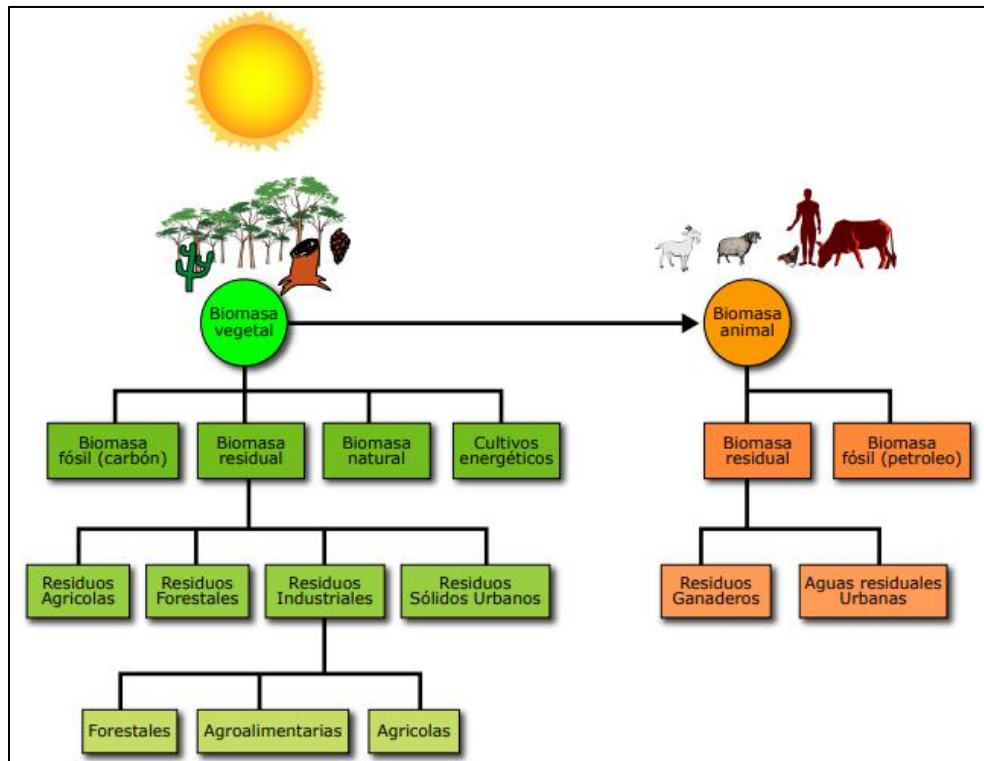


Figura 1. Clasificación de las fuentes de biomasa, Tomado de: [34]

3.3.2. Biomasa como energía renovable.

La biomasa puede considerarse una fuente de energía renovable siempre y cuando no se utilicen cantidades superiores a las que puede producir la naturaleza, el aprovechamiento de la biomasa puede generar sustancias contaminantes. Sin embargo, el uso de esta como un recurso energético no contribuye al incremento o generación excesiva de dióxido de carbono en la atmósfera a diferencia de los combustibles fósiles. Teniendo en cuenta que los biocombustibles pueden llegar a generar aproximadamente un 65% menos de CO_2 en comparación con los combustibles fósiles; es importante mencionar que para los residuos ganaderos o para los residuos que se someten a procesos de digestión anaerobia, la explotación de los mismos puede tener ventajas medioambientales debido a que se filtran residuos orgánicos contaminantes que inevitablemente se generan en este sector y se pueden usar como fertilizantes [34].

La biomasa es un recurso que se presenta en variedad de materiales como la madera, restos de semillas, estiércol, desechos de papel, desechos domésticos, aguas residuales, entre otros. Las características de algunos de estos materiales permiten que estos se puedan emplear como combustibles, teniendo en cuenta que algunos requieren tratamientos previos o necesitan distintas tecnologías antes de aprovecharlos. En la figura 2 se puede observar las posibles aplicaciones que tiene la biomasa y los procesos que se necesitan para el aprovechamiento de esta [34].

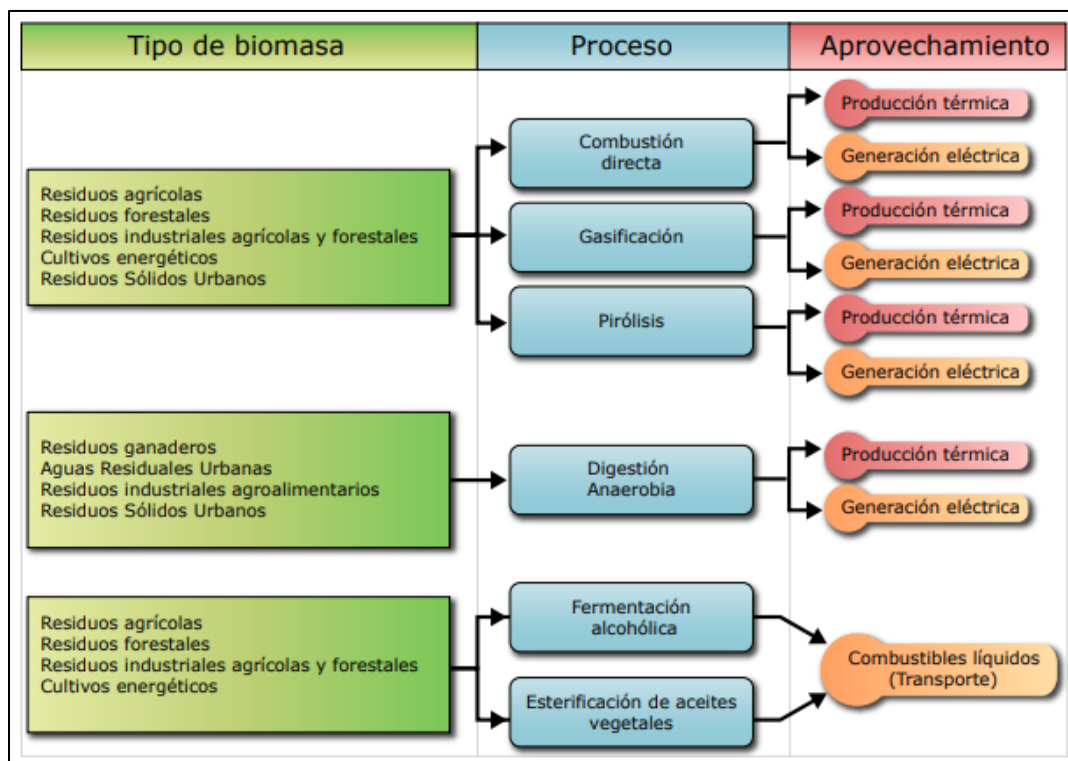


Figura 2. Aplicaciones de la biomasa, Tomado de: [34]

Tal como se observa en el diagrama de la figura 2, los residuos ganaderos requieren de un proceso biológico, estos procesos permiten obtener productos de alta densidad energética mediante la degradación de la biomasa húmeda gracias a la acción de microorganismos que contiene la biomasa o que se incorporan al proceso, uno de los procesos más conocidos es la biometanización, que se lleva a cabo en la ausencia de oxígeno y a través de diferentes etapas en las que intervienen un grupo heterogéneo de microorganismos, que van a transformar la fracción más degradable de la materia orgánica en biogás y los compuestos de difícil digestión van a conformar el digestato (descomposición en condiciones de poco oxígeno), este biogás va a estar compuesto en su mayoría por metano CH_4 y dióxido de carbono CO_2 , pero también se van a encontrar gases de menor proporción como H_2O en estado gaseoso, H_2S , entre otros.[34]

El proceso de producción de biogás es complejo por lo que se desarrolla en tres etapas; la primera de ellas es hidrólisis, es en donde una población de bacterias descomponen la materia orgánica en azúcares; la segunda etapa es la acetogénica, ahí los azúcares se transforman en ácidos orgánicos; y en la tercera etapa metanogénica se produce la transformación de las sustancias anteriormente obtenidas en metano CH_4 y gases ácidos como el CO_2 y el H_2S , este proceso se puede observar en el diagrama de la figura 3 [34][35].

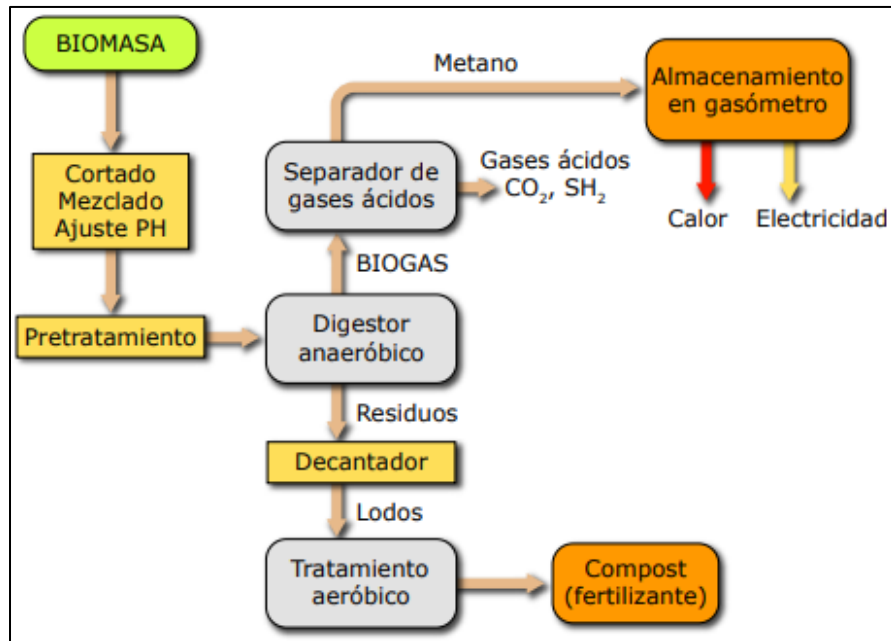


Figura 3. Esquema del proceso de digestión anaerobia, Tomado de: [34]

3.3.3. Biogás.

Es un combustible natural de gran poder calorífico compuesto principalmente por la mezcla de gas metano CH_4 y dióxido de carbono CO_2 , aunque también cuenta con la presencia de otros gases que se generan durante la descomposición anaeróbica de la materia orgánica por la actividad de microorganismos. Las aplicaciones más comunes del biogás son: calentamiento, combustión de calderas de vapor convencionales y como combustible de motores de combustión interna destinados a la generación de electricidad [34][36].

3.4. Métricas de desempeño.

Estas métricas permiten evaluar y medir la eficiencia, confiabilidad, seguridad y calidad de la producción de energía en diversas instalaciones y sistemas energéticos.

3.4.1. Factor de Capacidad (CF).

El factor de capacidad (CF) es un indicador del rendimiento operativo de una planta que toma en cuenta de forma global todos los factores que disminuyen la producción real de la planta respecto a su producción ideal. Expresa la relación entre la energía de la fuente (E_F) y la energía de la carga (E_N) [37].

$$CF(\%) = \left[\frac{E_F}{E_N} \right] \cdot 100\% \quad (\text{Ecuación 1})$$

3.4.2. Relación de Desempeño (PR).

Este coeficiente de rendimiento expresa la relación entre la densidad de la carga y la densidad de la fuente, indicando el porcentaje de energía disponible para exportar a la red fuera de las pérdidas y el consumo propio de su instalación. En comparación con el factor de carga, este es independiente de la ubicación y del tipo de planta, por lo que es útil para comparar plantas similares con localización diferente [37].

No es posible alcanzar un valor real del 100% puesto que en la operación se producen pérdidas inevitables, pero un valor mayor del coeficiente de rendimiento va a indicar que la producción real de una planta está más cerca de su valor nominal [37].

$$PR(\%) = \frac{D_{carga}}{D_{fuente}} \cdot 100[\%] \quad (\text{Ecuación 2})$$

3.4.3. Relación de Producción (Yr).

Rendimiento final o específico, es la relación entre la energía final producida y la potencia pico de la instalación, por lo tanto, normaliza la energía producida respecto al tamaño de la planta. Este es un buen indicador para comparar el rendimiento de varias plantas situadas en localizaciones próximas que tienen estructuras similares, se debe tener en cuenta que para plantas en ubicaciones muy lejanas entre ellas no es válido por la diferencia de valores que se pueden presentar en la radiación solar. En situaciones en las que la planta no presente algún dispositivo para medir la radiación solar o que estos datos no estén disponibles, una opción sería medir el rendimiento de esta a partir usando esta métrica [37].

3.5. Normalización y desnormalización de datos.

La normalización es una técnica que consiste en reescalar o transformar datos sin procesar de modo que cada característica tenga una contribución uniforme. El objetivo principal es equilibrar la influencia de aquellas características que tienen un peso numérico mayor en las clases de patrones discriminantes. Uno de estos métodos de normalización es la Normalización Min-Max que consiste en escalar linealmente los datos no normalizados a límites inferior y superior, generalmente los datos transformados se encuentran dentro de un rango de 0 a 1. La ecuación se expresa de la siguiente forma: [38]

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

En donde:

X : representa el valor actual.

$X_{\min}$: denota el valor mínimo del conjunto de datos.

$X_{m\acute{a}x}$: indica el valor máximo del conjunto de datos.

En el caso de la desnormalizaci3n se reorganiza la ecuaci3n de normalizaci3n para despejar X' , teniendo como resultado la ecuaci3n que se presenta a continuaci3n [38]:

$$X = X' \cdot (X_{m\acute{a}x} - X_{m\acute{i}n}) + X_{m\acute{i}n} \quad (\text{Ecuaci3n 4})$$

Donde:

X' : denota el valor normalizado.

$X_{m\acute{i}n}$: representa el valor mínimo del conjunto de datos.

$X_{m\acute{a}x}$: es el valor máximo del conjunto de datos.

3.6. Clustering.

Es la tarea de agrupar los objetos en subclases significativas, se centra en la agrupaci3n de datos secuenciales en los que cada objeto se representa como una secuencia de conjuntos de elementos, denominados *itemsets*. Esta secuencia se llama *data-sequence*. Para conjuntos de datos secuenciales, el problema de clustering se convierte en encontrar grupos de secuencias de datos similares entre sí [39].

3.6.1. K-means.

Es una técnica de agrupamiento particional en donde se crea una partici3n de un nivel de los puntos de datos, este tipo de agrupamiento intenta dividir un conjunto de datos en k clústeres de forma que la partici3n optimice un criterio determinado. Los enfoques basados en centroides, tipificados por *k-means*, intentan asignar objetos a los clústeres de forma que minimice la distancia cuadrática media de los objetos al centroide del clúster asignado [39].

3.7. Método del codo.

El método del codo se emplea para determinar la cantidad 3ptima de agrupaciones, y se realiza por medio de la suma de distancias al cuadrado (Sum of Squared Errors o SSE) entre los puntos y el centroide de cada clúster. Este proceso se repite iterativamente para diferentes valores de K , que representan el número de agrupaciones. Luego, se grafican los SSE en funci3n del número de grupos, y se identifica el punto de inflexi3n donde la curva muestra una convergencia significativa. La ecuaci3n que calcula la suma de distancias al cuadrado se define como [40]:

$$SSE = \sum_{K=1}^K \sum_{x_i \in S_k} \|X_i - C_k\|^2 \quad (\text{Ecuaci3n 5})$$

Donde:

K : es el número total de clústeres.

x_i : representa cada punto de datos.

S_k : indica el conjunto de puntos asignados al clúster K .

C_k : es el centroide del clúster K .

$\|X_i - C_k\|^2$: es la distancia euclidiana al cuadrado entre el punto X_i y el centroide C_k .

4. Diseño Metodológico

El proyecto se lleva a cabo en cinco fases basadas en los objetivos específicos definidos; las dos primeras fases abarcan el preprocesamiento de datos usando la técnica de Agrupamiento o Clustering, en particular K-means; en la tercera fase se realiza el dimensionamiento conceptual de la microrred híbrida; en la cuarta fase se evalúa la prefactibilidad técnica del diseño conceptual de una microrred híbrida de energía solar fotovoltaica y biomasa; finalmente, en la quinta fase se consolidan los resultados obtenidos en las fases anteriores, en la figura 4 se presenta el diagrama de las fases a realizar.

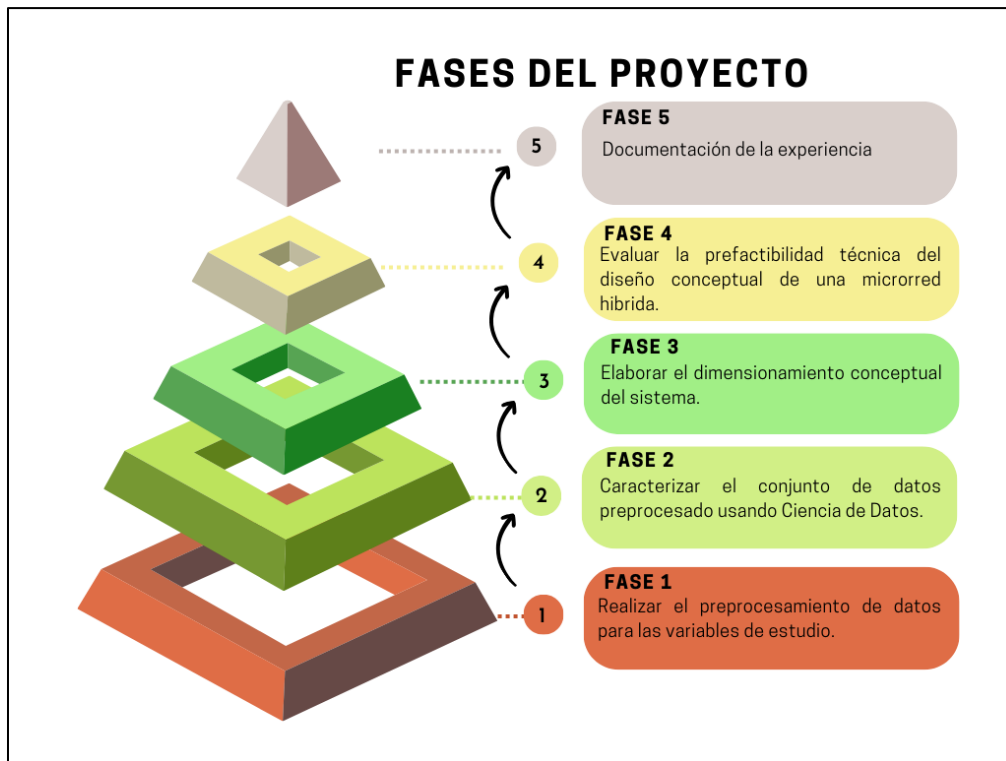


Figura 4. Diagrama de fases, Tomado de: autores.

Las fases del proyecto permiten identificar los pasos a seguir para alcanzar el cumplimiento pleno de los objetivos propuestos, a continuación, se describe a detalle las características en las que consiste cada una de las fases:

4.1. Fases.

4.1.1. Fase 1: Preprocesamiento de datos.

Para el desarrollo de la primera fase se solicitan los datos de temperatura e irradiancia solar de una estación meteorológica ubicada en Rionegro Santander y pruebas de laboratorio de pH, temperatura y potencial de metanización del residuo orgánico (estiércol). Se toman datos durante un año del 1 de enero al 31 de diciembre de 2022 y se ordena la información recopilada del dataset teniendo en

cuenta las características de estudio ya mencionadas anteriormente, de igual forma se descartan datos atípicos, inconsistentes u *Outliers* haciendo uso de un software especializado que permita realizar gestión de datos.

4.1.2. Fase 2: Caracterización del conjunto de datos.

En esta fase se lleva a cabo el análisis de los datos recopilados; se hace una comparación para identificar la mejor técnica de distribución dentro de la cual se encuentra la técnica de Agrupamiento: *K-means* o *Clustering*, esta consiste en agrupar datos en diferentes conjuntos que permitan que los elementos de un mismo grupo sean más similares entre sí que con las otras clases, es decir, obtener el dato más representativo de una gran cantidad de datos o como se conoce en estadística el valor esperado o más probable, esto con el propósito de explorar patrones u obtener estructuras ocultas en datos no etiquetados para una posterior toma de decisiones.

4.1.3. Fase 3: Dimensionamiento conceptual del sistema.

Se realiza el análisis de los recursos energéticos factibles en La Finca “Si Dios Quiere” con el propósito de efectuar el dimensionamiento conceptual de la microrred híbrida de energía solar fotovoltaica y biomasa, teniendo en cuenta algunos parámetros de diseño básicos, tales como, tensión de trabajo, potencia nominal de los equipos y conexión de los equipos más relevantes, para finalmente suministrar al usuario de manera preliminar los elementos necesarios para la implementación de un sistema híbrido futuro:

- Paneles solares: Cantidad, potencia nominal, eficiencia, temperatura de operación, dimensiones, peso y tipo de celdas solares.
- Baterías: Cantidad, capacidad y tensión de trabajo.
- Biodigestor: Tamaño, capacidad, temperatura de operación y sistema de recolección de biogás.
- Inversor: Potencia nominal de la carga.

4.1.4. Fase 4: Evaluación de la prefactibilidad técnica del diseño conceptual de una microrred híbrida.

Teniendo en cuenta las actividades realizadas en las fases anteriores se determinan las métricas de desempeño: Factor de Capacidad o de Planta (*Capacity Factor*) que se usa para evaluar la eficiencia operativa de una planta de generación de energía, Relación de desempeño (*Performance Ratio*) que se enfoca en la eficiencia de conversión en sistemas solares y Horas Equivalentes del Recurso Energético Suministrado (*Performance Yields*) que proporciona una visión general de la

eficiencia de una planta en relación con su capacidad nominal. Estas métricas son esenciales a la hora de estimar el desempeño y la eficiencia de las instalaciones de generación de energía y para identificar posibles áreas de mejora. Teniendo en cuenta esto se evalúa la prefactibilidad técnica del diseño conceptual de la microrred híbrida de energía solar fotovoltaica y de biomasa en la Finca “Si Dios Quiere” ubicada en Rionegro, Santander.

4.1.5. Fase 5: Documentación de la experiencia

En esta fase se tienen en cuenta los resultados obtenidos en las fases anteriores y se realiza un registro de estos, para de esta manera mostrar el proceso realizado durante el desarrollo del proyecto y el total cumplimiento de los objetivos planteados.

4.2. Cronograma

Considerando el diseño metodológico propuesto para la ejecución del proyecto, se establece la distribución de las fases y tareas necesarias para el cumplimiento de cada objetivo, con su respectivo tiempo destinado para cada una de ellas, teniendo en cuenta que el proyecto debe ser culminado pasados seis meses.

NOTA: En la tabla 2, las barras de color gris oscuro indican las semanas de vacaciones de diciembre y enero y el mes de mayo en el que se debe hacer la entrega final del documento y la sustentación, por lo tanto, estas semanas no se destinan para trabajo del proyecto.

Tabla 2. Cronograma de actividades.

[illegible]

5. Desarrollo Conceptual y Resultados

En este capítulo se encuentra el procedimiento realizado y los resultados obtenidos de las cuatro fases propuestas en el diseño metodológico que se observan en el diagrama de la figura 4, cada una de estas fases cuenta con dos actividades que permiten dar solución a los objetivos.

5.1. Fase 1. Preprocesamiento de datos.

5.1.1. Recopilación de datos.

En el desarrollo de esta primera fase se realiza el envío de un correo al Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) solicitando los datos de temperatura, irradiancia y brillo solar cada 5 minutos en la estación meteorológica Sabana de Torres – AUT de categoría Climática Principal ubicada en el departamento de Santander de código 2319500066. Teniendo respuesta por parte del instituto un mes después debido a una falla en el sistema de información “Datos Hidrológicos y Metrológicos” (DHIME); por lo tanto no fueron entregados los datos de la estación solicitada y en su lugar suministraron un backup con los datos disponibles de las estaciones meteorológicas a nivel nacional.

Teniendo en cuenta los archivos recibidos, se realiza una clasificación por ubicación geográfica, para así obtener información de las estaciones ubicadas en el sector del caso de estudio, luego se catalogan las estaciones de categoría climática principal, este tipo de estación permite obtener datos de precipitación, temperatura del aire, temperaturas máxima y mínima a 2 metros, humedad, viento, radiación, brillo solar y evaporación [41], es necesario tener en cuenta que la estación se encuentre activa, es decir, en funcionamiento. Finalmente, tomando en cuenta la información suministrada se realiza una búsqueda de las variables de interés considerando el glosario determinado por el IDEAM, como se observa en las tablas 3, 4, y 5, se toma en cuenta el código de la estación, la fecha de instalación, las variables sobre las cuales se tiene registro en la copia de seguridad, el tiempo en el que se realiza toma de los datos y la distancia lineal entre el caso de estudio y la ubicación de la estación.

- Escuela Agrícola Mogotes [24025040] – Mogotes, Santander.

Tabla 3. Datos IDEAM - Estación Meteorológica 1.

Fecha de instalación	VARIABLES			Distancia
	Glosario	Significado	Tiempo	
15/11/1973	TV_CAL	Tensión de vapor calculada horaria	3 x día	148 [km]
	RCAM_CON	Recorrido del viento diario	Diario	
	NB_CON	Nubosidad de las 700, 1300 y 1800	Diario	
	HR_CAL_MEDIA_D	Humedad relativa calculada media diaria	Diario	
	FA_CON	Fenómeno Atmosférico de las 700, 1300 y 1800	Diario	
	EVTE_CON	Evaporación total diaria	Horario	

	BSHG_TT_D	Brillo solar total diario	Diario
	TSSM_MX_D	Temperatura seca máxima diaria	Diario
	TSSM_MN_D	Temperatura seca mínima diaria	Diario
	TSSM_MEDIA_D	Temperatura seca media diaria	Diario
	TSSM_CON	Temperatura seca de las 700, 1300 y 1800	3 x día

➤ Berlín [37015020] – Tona, Santander.

Tabla 4. Datos IDEAM - Estación Meteorológica 2.

Fecha de instalación	VARIABLES			Distancia
	Glosario	Significado	Tiempo	
15/05/1968	TV_CAL	Tensión de vapor calculada horaria	3 x día	177 [km]
	TPR_CAL	Temperatura del punto de rocío calculada horaria	3 x día	
	RCAM_CON	Recorrido del viento diario	Diario	
	NB-CON	Nubosidad de las 700, 1300 y 1800	Diario	
	HR_CAL_MEDIA_D	Húmeda relativa calculada media diaria	Diario	
	FA_CON	Fenómeno Atmosférico de las 700, 1300 y 1800	Diario	
	EVTE_CON	Evaporación total diaria	Horario	
	TSSM_MX_D	Temperatura seca máxima diaria	Diario	
	TSSM_MN_D	Temperatura seca mínima diaria	Diario	
	TSSM_MEDIA_D	Temperatura seca media diaria	Diario	
	TSSM_CON	Temperatura seca de las 700, 1300 y 1800	3 x día	

➤ Villa Leiva [23185010] – Sabana de Torres, Santander.

Tabla 5. Datos IDEAM - Estación Meteorológica 3.

Fecha de instalación	VARIABLES			Distancia
	Glosario	Significado	Tiempo	
15/01/1966	VVAG_CON	Velocidad del viento de las 24 horas	Horario	112 [km]
	TV_CAL	Tensión de vapor calculada horaria	3 x día	
	TPR_CAL	Temperatura del punto de rocío calculada horaria	3 x día	
	RCAM_CON	Recorrido del viento diario	Diario	
	NB_CON	Nubosidad de las 700, 1300 y 1800	Diario	
	HR_CAL_MEDIA_D	Húmeda relativa calculada media diaria	Diario	
	FA_CON	Fenómeno Atmosférico de las 700, 1300 y 1800	Diario	
	EVTE_CON	Evaporación total diaria	Horario	
	DVAG_CON	Dirección del viento de las 24 horas	Horario	
	TSSM_MX_D	Temperatura seca máxima diaria	Diario	
	TSSM_MN_D	Temperatura seca mínima diaria	Diario	
	TSSM_MEDIA_D	Temperatura seca media diaria	Diario	
	TSSM_CON	Temperatura seca de las 700, 1300 y 1800	3 x día	

Considerando los resultados obtenidos en las tablas 3, 4 y 5, se busca identificar una estación meteorológica que contenga datos de temperatura e irradiancia y brillo solar, como se observa no hay una estación que incluya las tres variables por lo que se decide hacer uso de *NASA POWER Data Access Viewer*, este es un recurso que proporciona conjuntos de datos solares y meteorológicos procedentes de la investigación de la NASA [42]; para ello es necesario especificar el tiempo de la toma de datos, que en este caso debe ser cada hora, se ingresan las coordenadas de la finca en longitud y latitud, se selecciona el tipo de formato en el que se requiere descargar el archivo y se buscan los parámetros, dentro de los cuales se selecciona *All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance*, y *Temperature at 2 Meters*, al descargar los datos se obtiene un archivo .csv.

Teniendo en cuenta que los datos proporcionados son tomados por satélites pueden tener un margen de error mayor en comparación con los datos del IDEAM que son tomados en estaciones meteorológicas ubicadas en tierra, por ello se decide ampliar la ventana de tiempo de la toma de datos a 10 años desde el 01/01/2012 al 01/01/2022; además de ello para escoger la variable de temperatura se considera que la instalación de los paneles se debe realizar sobre una base o una estructura que los ubica a una altura respecto al suelo.

Seguido a esto se solicitan los datos de biomasa, estos son tomados de un estudio previamente realizado por estudiantes de la Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB), en el que se lleva a cabo la implementación de un Biodigestor para el aprovechamiento energético de residuos orgánicos de búfalas y becerros en el municipio de Rionegro, Santander, con el propósito de permitir suplir necesidades básicas como cocinar debido a que acceder a gas propano resulta costoso por la ubicación geográfica de la finca [43]. Estos datos se tomaron en un periodo de 29 días en diferentes intervalos de tiempo, desde el 10/10/2021 hasta el 7/11/2021, teniendo variables como tiempo [*h*], temperatura [*°C*], presión [*psi*] y un valor analógico leído por un sensor de referencia MQ-4, en la tabla 6 se muestran los datos obtenidos en el día 1.

Tabla 6. Datos Biomasa día 1.

Fecha	Hora	Temperatura [<i>°C</i>]	Presión [<i>psi</i>]	Valor Analógico
10/10/2021	2:27 p. m.	36,56	9	1
	3:00 p. m.	37,38	9	21
	4:00 p. m.	38,19	9	4
	6:00 p. m.	30,37	9	18
	7:00 p. m.	28,81	9	8
	9:00 p. m.	27,56	9	12
	10:00 p. m.	27,44	9	22

Para acceder a los datos de Biomasa y de Energía Solar Fotovoltaica ingresar al enlace que se encuentra a continuación:

[Datos Proyecto de Grado - ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA MICRORRED HÍBRIDA CON ENERGÍA SOLAR](#)

FOTOVOLTAICA Y BIOMASA EN EL MUNICIPIO RIONEGRO, SANTANDER CASO DE ESTUDIO FINCA SI DIOS QUIERE

5.1.2. Procesamiento de la información recolectada para el dataset.

Los datos de energía solar se descargan en un archivo .csv, se organizan y se eliminan los datos de las 6:00 p.m. hasta las 4:00 a.m. debido a que en la noche no hay radiación solar por lo que la variable *All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance* presentaba valores de 0 los cuales afectan la distribución y distorsionan las medidas de dispersión, luego se obtienen los valores estadísticos descriptivos con los que se pudo observar que tanto los valores mínimos como máximos de cada una de las variables presentan una gran diferencia, de manera que se decide normalizar los datos para que todos se encuentren dentro de un mismo rango y de esta forma facilitar el análisis; en este caso el rango de normalización es de 0 a 1 y se aplica la técnica de normalización Mín-Máx que está dada por la ecuación 3, por último se eliminan las columnas de año, mes y día puesto que no son necesarias para continuar con el tratamiento de los datos.

Teniendo los datos que se observan en la tabla 6 para los 29 días, es necesario realizar la conversión del valor analógico tomado por el sensor a CH_4 [ppm], cabe resaltar que la referencia del sensor es MQ-4 y este no solo lee datos de CH_4 , sino que detecta datos de otros gases.

En el código de Arduino realizado en [43] pág. 50, se registra el dato leído por el sensor en una variable llamada gas y se aplica la función analogRead() que representa el voltaje leído en el terminal, este valor lo multiplican por 10.000 y lo dividen en 1.023, por lo que para encontrar el valor de tensión, se debe realizar el procedimiento inverso, es decir aplicar la ecuación 6; este proceso se realiza para todos los datos proporcionados y como se puede observar en la tabla 7 se halla un valor de tensión por cada hora de toma.

$$\frac{\text{Valor analógico} * 1.023}{10.000} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Tabla 7. Cálculo de la tensión, día 1.

Fecha	Hora	Tempratura [°C]	Presion [psi]	Valor analógico	Tensión
10/10/2021	2:27 p. m.	36,56	9	1	0,1023
	3:00 p. m.	37,38	9	21	2,1483
	4:00 p. m.	38,19	9	4	0,4092
	6:00 p. m.	30,37	9	18	1,8414
	7:00 p. m.	28,81	9	8	0,8184
	9:00 p. m.	27,56	9	12	1,2276
	10:00 p. m.	27,44	9	22	2,2506

Para encontrar el valor de $CH_4[ppm]$ se debe aplicar algunas ecuaciones de [44], en este documento se lleva a cabo el diseño de un sistema de medición de variables para un proceso de biodigestión, en la Universidad Piloto de Colombia.

Para encontrar el valor de la resistencia RS se aplica la ecuación 7.

$$RS = \left(\frac{VCC}{VRL} - 1 \right) * RL \quad (\text{Ecuación 7})$$

$VCC = 5[V]$, este valor se toma porque es la alimentación suministrada por el Arduino.

VRL , es el valor de tensión entregado por el sensor, es decir el calculado aplicando la ecuación 6.

RL , es una resistencia SMD de $1.000[\Omega]$

Para poder medir $CH_4[ppm]$ es necesario realizar la relación de RS con R_0 , por lo que se debe emplear la ecuación 8.

$$\frac{RS}{R_0} \quad (\text{Ecuación 8})$$

RS , corresponde al valor calculado en la ecuación 7.

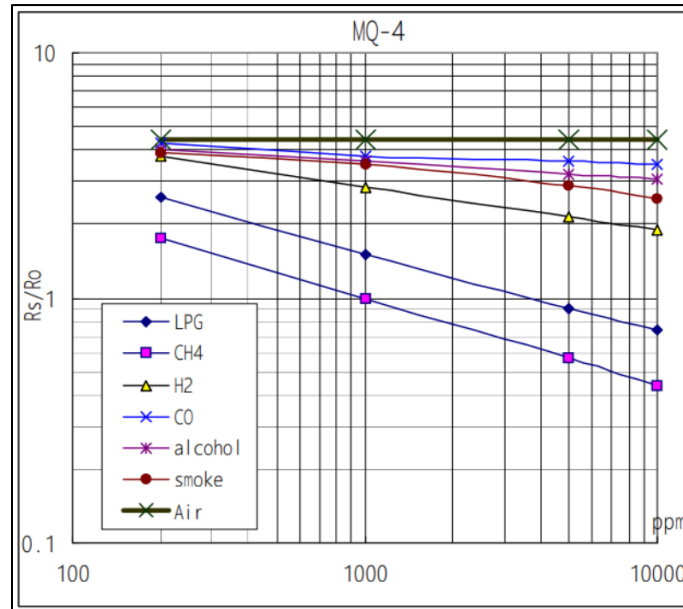
$$R_0 = 1.000[\Omega]$$

En [44] realizan el cálculo de la resistencia para el sensor en donde a partir de una gráfica se determinan la ecuación característica del sensor, en este calculan el valor de R^2 y la ecuación de la función exponencial que se presenta en la ecuación 9.

$$y = 1.000x^{-2,955} \quad (\text{Ecuación 9})$$

La ecuación 9, permite realizar el cálculo de $[ppm]$ de los gases caracterizados por el sensor, por lo que se reemplaza en la ecuación el valor de x por el calculado de la relación de RS y R_0 $\left(\frac{RS}{R_0} \right)$.

Al encontrar todos los valores de $[ppm]$, es necesario identificar cuales pertenecen a metano (CH_4), que es el gas de interés, por lo que en [44] se puede encontrar la curva característica del comportamiento del sensor, en esta se muestra la relación $\frac{RS}{R_0}$ y la concentración de los gases en partes por millón $[ppm]$, tal como se observa en la gráfica 1.



Gráfica 1. Comportamiento del sensor MQ-4, Tomado de: [44]

Como se puede ver la gráfica presenta el comportamiento de diversos gases, en esta se identifica el de CH_4 , para determinar cuales de los valores del dataset pertenecen a metano, se observa en la gráfica que valor máximo de CH_4 es cercano a 2, por lo que se hace un condicional a los valores de $\frac{RS}{R_0}$, en donde se establece que si el valor de $\frac{RS}{R_0}$ es menor o igual a 2 pertenece a metano, si esta condición no se cumple el dato pertenece a otro gas, en la tabla 8 se presentan los resultados obtenidos para el día 1.

Tabla 8. Caracterización del sensor, día 1.

Fecha	Hora	Tensión	Rs	Rs/R0	[ppm]	
10/10/2021	2:27 p. m.	0,1023	47875,85533	47,875855	0,010845651	Otro gas
	3:00 p. m.	2,1483	1327,421682	1,3274217	433,0207215	Metano
	4:00 p. m.	0,4092	11218,96383	11,218964	0,789568166	Otro gas
	6:00 p. m.	1,8414	1715,325296	1,7153253	203,0047106	Metano
	7:00 p. m.	0,8184	5109,481916	5,1094819	8,0676372	Otro gas
	9:00 p. m.	1,2276	3072,987944	3,0729879	36,24579829	Otro gas
	10:00 p. m.	2,2506	1221,629788	1,2216298	553,4691788	Metano

Así mismo, es necesario que los datos de biomasa se encuentren en unidades de $\left[\frac{mg}{m^3}\right]$ que indica los miligramos de una sustancia por metro cúbico de aire o fluido, por ende, se lleva los datos de $CH_4[ppm]$ a $\left[\frac{mg_{CH_4}}{m^3_{Aire}}\right]$, para ello se fijan valores como:

$$\left[\frac{L}{m^3} \right] = 1.000 \quad ; \quad \left[\frac{mg}{g} \right] = 1.000$$

Como se observa en la tabla 9, se calcula el peso molecular del CH_4 , teniendo en cuenta el peso atómico del hidrógeno, del carbono y el número de átomos de cada elemento, por lo que se fija $\left[\frac{mg}{mol} \right] = 16$.

Tabla 9. Cálculo peso molecular del CH_4 .

CH_4	Peso Atómico	Peso
C	12	12
4H	1	4
	Peso Total	16

En el caso de la temperatura, inicialmente se tenía en $^{\circ}C$ y se convierte a $[K]$ usando la ecuación 10:

$$T[K] = T[^{\circ}C] + 273 \quad (\text{Ecuación 10})$$

De igual forma, se realiza la conversión de presión $[psi]$ a $[atm]$ aplicando la ecuación 11:

$$[atm] = \frac{[psi]}{14,6959} \quad (\text{Ecuación 11})$$

atm : Presión en atmosferas

psi : Presión en libras por pulgada cuadrada

14,6959: Presión atmosférica estándar al nivel del mar

Así mismo, utilizando la ecuación 12 se calcula la concentración de metano en el aire $\left[\frac{m_{CH_4}^3}{m_{Aire}^3} \right]$:

$$\left[\frac{m_{CH_4}^3}{m_{Aire}^3} \right] = \frac{CH_4[ppm]}{1.000.000} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Para llegar a $\left[\frac{mg_{CH_4}}{m_{Aire}^3} \right]$, usando la ecuación 13 de gases ideales, se despeja para encontrar el volumen tal como se observa en la ecuación 14 y se fija el valor de $R = 0.082 \left[\frac{atm \cdot L}{mol \cdot K} \right]$, esta es una constante universal de los gases ideales.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (\text{Ecuación 13})$$

(Ecuación 14)

$$\rightarrow V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P}$$

P : Presión absoluta [atm]

V : Volumen[L]

n : N° de moles

T : Temperatura absoluta [°K]

Para calcular la cantidad de moles presentes en un litro de CH_4 $\left[\frac{mol}{L}\right]$ se emplea la ecuación 15, haciendo uso del volumen calculado en la ecuación 14:

$$\left[\frac{mol}{L}\right] = \frac{1}{V} \quad (Ecuación 15)$$

Finalmente, para encontrar $\left[\frac{mg_{CH_4}}{m^3_{Aire}}\right]$, se aplica la ecuación 16

$$\left[\frac{mg_{CH_4}}{m^3_{Aire}}\right] = \left[\frac{m^3_{CH_4}}{m^3_{Aire}}\right] \cdot \left[\frac{L}{m^3}\right] \cdot \left[\frac{mol}{L}\right] \cdot \left[\frac{g}{mol}\right] \cdot \left[\frac{mg}{g}\right] \quad (Ecuación 16)$$

Cabe resaltar que los cálculos mencionados anteriormente, se aplican para los datos de CH_4 por hora que se tienen durante los 29 días de la toma, en la tabla 10 se observan los resultados obtenidos al aplicar las ecuaciones anteriormente mencionadas en los datos del día 1.

Tabla 10. Cálculo de mg_{CH_4}/m^3_{Aire} , día 1.

Fecha	Hora	[K]	Presión [Atm]	$m^3_{CH_4}/m^3_{aire}$	mol/L	$V=nRT/P$	mg_{CH_4}/m^3_{Aire}
10/10/2021	2:27 p. m.	309,56	0,6124	1,0845E-08	0,0241	41,4488	0,0041
	3:00 p. m.	310,38	0,6124	0,0004	0,0240	41,5586	166,7122
	4:00 p. m.	311,19	0,6124	7,8956E-07	0,0239	41,6670	0,3031
	6:00 p. m.	303,37	0,6124	0,0002	0,0246	40,6200	79,9624
	7:00 p. m.	301,81	0,6124	8,0676E-06	0,0247	40,4111	3,1942
	9:00 p. m.	300,56	0,6124	3,6245E-05	0,0248	40,2437	14,4104
	10:00 p. m.	300,44	0,6124	0,0005	0,0248	40,2277	220,1345

5.2. Fase 2: Caracterización del conjunto de datos.

5.2.1. Técnica de distribución Clustering para Energía Solar Fotovoltaica.

En la figura 5, se observa la cantidad de datos luego de completar la Fase 1, se tienen un total de 47502 datos que incluyen las variables de tiempo [h], radiación

$\left[\frac{Wh}{m^2}\right]$ y temperatura $[^{\circ}C]$, los cuales son utilizados para calcular la cantidad de clusters.

	HR	ALLSKY_SFC_SW_DWN	T2M
0	0.000000	0.000000	0.120123
1	0.083333	0.044836	0.121438
2	0.166667	0.259740	0.183253
3	0.250000	0.498182	0.281894
4	0.333333	0.669851	0.377904
...	...	...	...
47497	0.666667	0.545142	0.769838
47498	0.750000	0.541161	0.752302
47499	0.833333	0.342684	0.716791
47500	0.916667	0.182149	0.651469
47501	1.000000	0.030997	0.525647

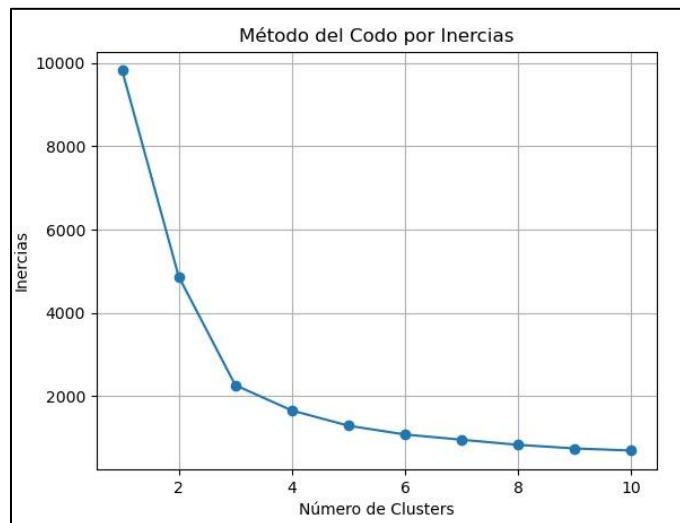
[47502 rows x 3 columns]

Figura 5. Datos de Energía Solar Normalizados.

Para realizar el cálculo de la cantidad de agrupaciones necesarias o clusters se emplean dos métodos, el primero es el método del codo por inercia y el segundo es el método del codo por distorsión, para ello se desarrolla un código de Python en el que se busca hacer el análisis de la técnica de distribución Clustering utilizando K-means.

➤ Método de codo por inercia.

Al realizar la implementación de este método se utilizan valores de inercia calculados luego de aplicar el algoritmo K-means a diferentes números de clusters, que van desde 1 hasta 10, como se muestra en la tabla 8. La inercia representa la suma de las distancias al cuadrado de cada punto dentro de un clúster a su centroide. Al analizar el comportamiento de la gráfica 2 y los valores de la tabla 11 se observa que el valor óptimo de clusters es 3 puesto que es el punto donde la curva muestra una disminución gradual y las pendientes de la recta se vuelven menos pronunciadas.



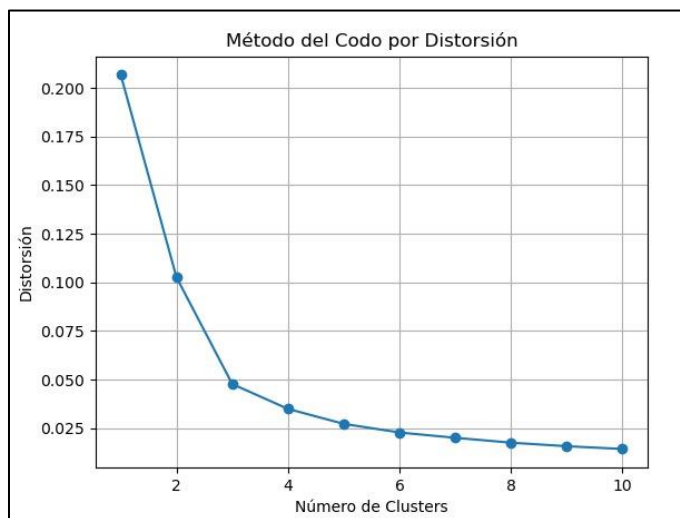
Gráfica 2. Método codo por Inercia.

Tabla 11. Método codo por Inercia.

Nº de Clusters	Inercia
1	9.820,3400
2	4.871,8003
3	2.265,6817
4	1.657,8372
5	1.292,3737
6	1.081,2823
7	955,3345
8	833,0376
9	746,2817
10	696,0397

➤ Método de codo por distorsión.

Este método se emplea para la comprobación del valor óptimo de clusters obtenido a través del método del codo por inercia. En este caso la distorsión se encuentra dada por la división de la inercia total en el número de muestras pertenecientes al conjunto de datos. Tal como se puede ver en la gráfica 3 y con los valores de la tabla 12 se comprueba que el valor de K es 3 por el cambio abrupto en la pendiente de la curva y el cambio de tendencia.

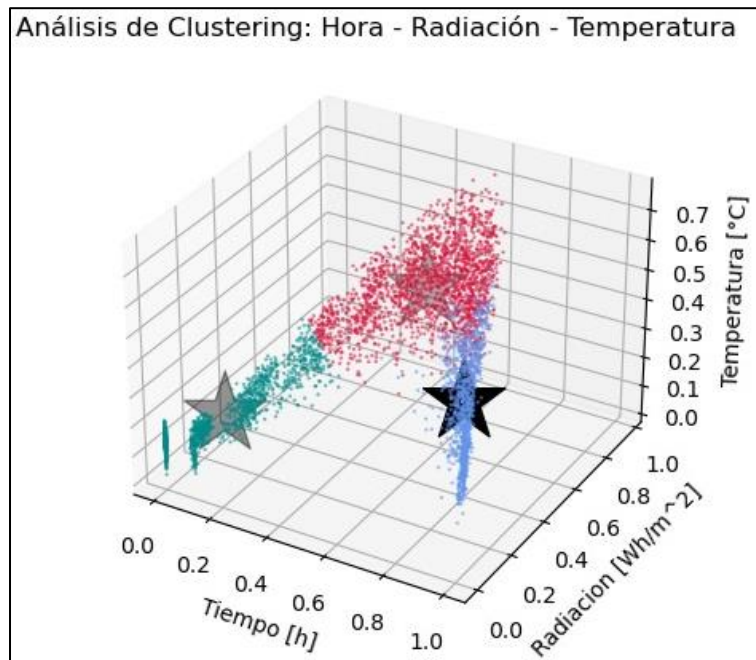


Gráfica 3. Método codo por distorsión.

Tabla 12. Método codo por distorsión.

Nº de Clusters	Distorsión
1	0,2067
2	0,1025
3	0,0476
4	0,0348
5	0,0272
6	0,0227
7	0,0200
8	0,0175
9	0,0157
10	0,0142

Luego de obtener los datos con las variables de interés y el número óptimo de clusters se realiza el análisis de Clustering con K-means para obtener la agrupación correspondiente al número de K, dentro de cada segmentación se encuentra un centroide el cual representa el punto central de cada clúster. Estas coordenadas son determinantes para analizar la estructura de los datos, sus características y comportamiento, como se puede ver en la gráfica 4, estos tres grupos son diferentes entre sí y cada uno cuenta con su respectivo centroide, en este caso la gráfica se encuentra en tercera dimensión con el propósito de realizar un análisis de las coordenadas de los centroides de las variables tiempo $[h]$ y radiación $\left[\frac{Wh}{m^2}\right]$, en donde se observe la influencia de la variable temperatura $[^{\circ}C]$.



Gráfica 4. Análisis de Clustering y centroides.

A continuación, en la tabla 13 se presentan los valores de las coordenadas de los centroides normalizados de los parámetros tiempo $[-]$ y radiación $[-]$.

Tabla 13. Coordenadas normalizadas de los centroides.

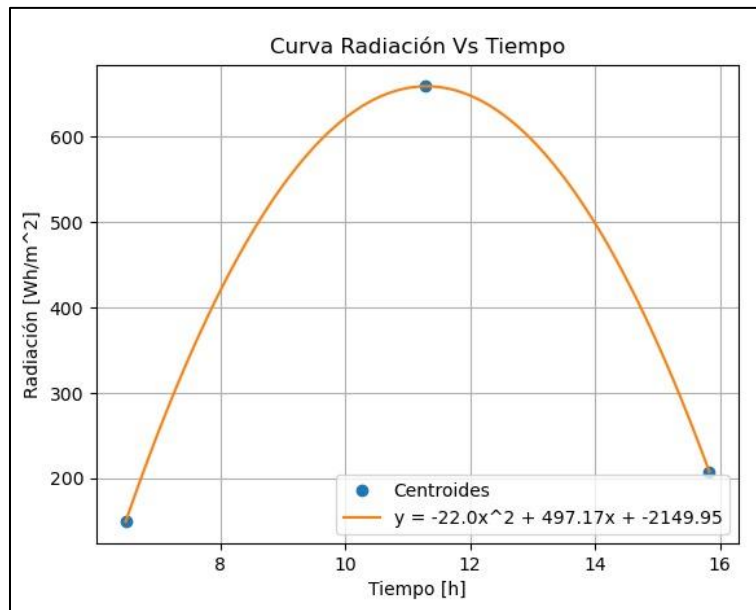
Coordenadas Normalizadas Tiempo $[-]$	Coordenadas Normalizadas Radiación $[-]$
0,1237	0,1473
0,5242	0,6510
0,9024	0,2052

Es necesario realizar la desnormalización de las coordenadas encontradas en la tabla 13, esto se hace aplicando la ecuación 4 que permite obtener los valores reales de las coordenadas de los centroides de las dos variables de interés, para de esta manera llevar a cabo el análisis de la implementación del algoritmo K-means.

Tabla 14. Coordenadas desnormalizadas de los centroides.

Coordenadas Desnormalizadas Tiempo[h]	Coordenadas Desnormalizadas Radiación $\left[\frac{Wh}{m^2}\right]$
6,4855	149,1671
11,2908	659,1202
15,8296	207,8344

En la tabla 14, se pueden apreciar los valores desnormalizados de cada centroide con los que se obtiene la curva de radiación $\left[\frac{Wh}{m^2}\right]$ vs tiempo [h] y su polinomio característico que permite determinar la viabilidad del sistema y encontrar el área bajo la curva (irradiación solar).



Gráfica 5. Curva radiación vs tiempo.

- Agrupación 1: El centroide 1 representa valores reducidos de radiación solar durante periodos prolongados de tiempo. Esta distribución indica las horas o los momentos donde la intensidad solar es más baja y la radiación que llega a la estación meteorológica es reducida, es decir en las horas de la mañana.
- Agrupación 2: Los puntos de este grupo en el que se encuentra el centroide 2 muestran los valores promedio de la radiación y del tiempo. Este clúster está relacionado con las horas cercanas al medio día, cuando la intensidad solar alcanza su punto máximo.
- Agrupación 3: De forma contraria al centroide 1, el centroide 3 representa una mayor radiación solar en menor tiempo o a menores horas del día, es decir que esta agrupación puede estar dada en horas de la tarde, ya que la cantidad de radiación es máxima en tales condiciones.

Teniendo en cuenta, el polinomio característico que se observa en la gráfica 5, se calcula el valor de la irradiación aplicando la ecuación cuadrática, para obtener los puntos de intersección, los cuales son, los límites de la integral de la ecuación 17.

$$I = \int_{t_1}^{t_2} Rad(t) dt \left[\frac{Wh}{m^2} \right] \quad (Ecuación 17)$$

Donde:

I : Es la energía disponible en la finca.

t_1 y t_2 : Son los puntos de intersección del polinomio característico y representan los límites de integración.

Rad : Es el polinomio característico que se obtiene en la gráfica 5.

$$I = \int_{5,8266}^{16,7740} (-21,998x^2 + 497,17x - 2150) dt \left[\frac{Wh}{m^2} \right]$$

$$I = 4.810,2819 \left[\frac{Wh}{m^2} \right]$$

Este valor de irradiación permite determinar cuál es la energía solar disponible en la finca.

5.2.2. Tratamiento datos Biomasa.

Teniendo la conversión de $CH_4[ppm]$ a $\left[\frac{mg_{CH_4}}{m^3_{Aire}} \right]$ se busca encontrar la potencia diaria suministrada por el biodigestor, para ello es necesario tener en cuenta las siguientes variables:

$$\rho_{CH_4} \left[\frac{kg}{m^3} \right] = 0,6570$$

$$\left[\frac{mg}{kg} \right] = 1.000.000$$

Para encontrar la densidad $[\rho]$ de CH_4 en $\left[\frac{mg}{m^3} \right]$ se aplica la ecuación 18.

$$\rho_{CH_4} \left[\frac{mg}{m^3} \right] = \rho_{CH_4} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot \left[\frac{mg}{kg} \right] \quad (Ecuación 18)$$

Luego de esto, se calcula el $[m^3_{CH_4}]$ utilizando la ecuación 19.

$$[m_{CH_4}^3] = \frac{\left[\frac{mg_{CH_4}}{m_{Aire}^3} \right]}{\rho_{CH_4} \left[\frac{mg}{m^3} \right]} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Así mismo se calcula $\left[\frac{kcal}{día} \right]$, $\left[\frac{kcal}{h} \right]$, $\left[\frac{kJ}{s} \right]$ usando las ecuaciones 20, 21 y 22.

$$\left[\frac{kcal}{día} \right] = [m_{CH_4}^3] \cdot 8.708,4 \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$\left[\frac{kcal}{h} \right] = \left[\frac{kcal}{día} \right] \cdot 24 \quad (\text{Ecuación 21})$$

$$\left[\frac{kJ}{s} \right] = \frac{\left(\left[\frac{kcal}{h} \right] \cdot 4,184 \right)}{3.600} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Por consiguiente, se requiere tener una potencia $[W]$, por lo que se toma el valor obtenido en la ecuación 22 y se multiplica por 1.000, teniendo en cuenta que $\left[\frac{kJ}{s} \right] = [kW]$, y seguido a esto se divide el valor obtenido de potencia $[W]$ por hora con el valor obtenido de $[m_{CH_4}^3]$, como se observa en la ecuación 23.

$$\frac{[W]}{[m_{CH_4}^3]} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Realizar este cálculo permite encontrar el valor de densidad de potencia de biomasa (DPB), por lo que se toman los valores pertenecientes a CH_4 y se realiza un promedio, entonces la $DPB = 421,7123 \left[\frac{W}{m^3} \right]$, tal como se puede ver en los resultados obtenidos en la tabla 15, estos son los datos del día 1 es decir 10/10/2021.

Se realiza el cálculo de las horas de uso del biodigestor usando la ecuación 24, para ello se toma en cuenta el volumen gaseoso calculado en [43] $V_G = 1,0268 [m^3]$ y el valor de consumo del generador CC700-MG Consumo de combustible = $0,84 \left[\frac{m^3}{h} \right]$.

$$\text{Horas de uso} = \frac{V_G}{\text{Consumo de combustible}} \quad (\text{Ecuación 24})$$

$$\text{Horas de uso} = \frac{1,0283[m^3]}{0,84 \left[\frac{m^3}{h} \right]} = 1,2342[h]$$

Teniendo estos datos, se calcula la densidad de energía de la biomasa (DEB), para ello es necesario efectuar la ecuación 25.

$$DEB = DPB * \text{Horas de uso} \quad (\text{Ecuación 25})$$

$$DEB = 421,7123 \left[\frac{W}{m^3} \right] * 1,2342 = 520,5135 \left[\frac{Wh}{m^3} \right]$$

Tabla 15. Cálculo de la densidad de potencia de Biomasa, día 1.

Hora de toma	[m3_CH4]	[kcal/día]	[kcal/h]	[kJ/s]= [kW]	Watts	Densidad de potencia [W/m3]
2:27 p. m.	6,372E-09	5,549E-05	2,312E-06	2,687E-09	2,6872E-06	421,71233
3:00 p. m.	0,0002	2,210E+00	9,207E-02	0,0001	0,1070	
4:00 p. m.	4,615E-07	4,019E-03	1,674E-04	1,946E-07	0,0001	
6:00 p. m.	1,217E-04	1,060E+00	4,416E-02	5,133E-05	0,0513	
7:00 p. m.	4,862E-06	4,234E-02	1,764E-03	2,050E-06	0,0020	
9:00 p. m.	2,193E-05	1,910E-01	7,959E-03	9,250E-06	0,0092	
10:00 p. m.	3,351E-04	2,918E+00	1,216E-01	1,413E-04	0,1412	

5.3. Fase 3: Dimensionamiento conceptual del sistema.

5.3.1. Sistema Solar Fotovoltaico.

Para realizar el dimensionamiento de la planta solar se lleva a cabo el cuadro de cargas que se observa en la tabla 16, a partir del cual se determina el consumo de energía diario que será suplido por el sistema de energía solar fotovoltaica.

Tabla 16. Cuadro de cargas para Energía solar.

Cantidad	Equipo	Ubicación	Referencia	Potencia [W]	Horas de uso [h]	Energía [Wh]
24	Luminaria	Establo	Bombillo LED 7 [W] E27 Luz blanca.	168	5	840
10	Luminaria	Casa	Bombillo LED 7 [W] E27 Luz blanca.	70	5	350
1	Televisor	Casa	K-TV 32HDG.	50	3	150
1	Nevera	Casa	Nevera Solar Vertical 310 [Lt] 24 [V]	48	24	1152
1	Lavadora	Casa		800	0,2	160
Total Potencia				1.136	E_N	2.652

Teniendo el valor de la energía de la carga (E_N) se selecciona un panel policristalino con las especificaciones técnicas que se encuentran en la tabla 17.

Tabla 17. Características técnicas del panel policristalino.

Marca	ZNSHINE SOLAR
Eficiencia del panel	17,94%
Serie	ZXP6-LD60
Dimensión del panel	1957x992x35 [mm]

Rango de Poder	270-295 [W]
Modulo fotovoltaico	Policristalino de doble vidrio 5BB
Degradación anual	0,50%
Corriente máxima de corto circuito (Isc)	11,1[A]
Tensión Nominal (Vmp)	34,5[V]
Corriente Nominal (Imp)	7,83[A]

Se escoge un panel policristalino, debido a que tiene una mayor vida útil a altas temperaturas considerando que la temperatura promedio en la Finca “Si Dios Quiere” equivale a $T_{AVG} = 28,46[^\circ C]$, además de que son más resistentes a la degradación por luz solar y a las inclemencias del tiempo, lo que hace que sean más estables en la producción de energía en condiciones de alta temperatura. Hay que tener en cuenta que este tipo de paneles tienen una menor eficiencia, en comparación con los paneles monocristalinos.

Posteriormente, se calcula el número de paneles (N_{pv}) a partir de la ecuación 26.

$$N_{pv} = \frac{E_N * f_s}{P_{pv} * HSP * R * \cos(\alpha)} \quad (\text{Ecuación 26})$$

En donde:

E_N : Energía de la carga.

f_s : Factor de seguridad.

P_{pv} : Potencia del panel.

$HSP = \frac{I}{1000}$: Horas de sol pico.

R : Rendimiento global de la instalación.

α : Inclinación del panel, se toma como 15° por la latitud de la finca, debido a que se encuentra cerca del Ecuador.

Se debe tener en cuenta que el valor de la E_N , se encuentra en el cuadro de cargas de la tabla 16, el factor de seguridad es igual a 1,25, la potencia del panel se encuentra en las especificaciones técnicas de la tabla 17 y para evaluar el HSP se toma el valor de la irradiación calculado en la ecuación 17 y se reemplaza como se muestra a continuación:

$$HSP = \frac{4.810,2819}{1.000} = 4,8102$$

Al haber identificado estos valores se reemplazan en la ecuación 26, teniendo:

$$N_{pv} = \frac{2.652 * 1,25}{270 * 4,8102 * 0,65 * \cos(15^\circ)}$$

$$N_{pv} = 4,0651 \cong 5$$

Este valor del número de paneles se aproxima, puesto que el valor de la potencia que se alcanza en el cuadro de cargas es de 1.136[W] y la potencia que se obtiene con los cuatro paneles de 270[W] es de 1.080[W], por lo que no se estaría cubriendo la energía de la carga con esa cantidad de paneles, por ello se decide tomar cinco paneles de la misma potencia que tendrían una potencia total de 1.350[W], lo cual sustentaría el valor de E_N calculado en la tabla 16.

Se desea encontrar el área del panel, por lo que usando las dimensiones que se encuentran en las características técnicas de los paneles que se observa en la tabla 17, se emplea la ecuación 27.

$$A = L_{pv} * W_{pv} [m^2] \quad (\text{Ecuación 27})$$

En la que:

L_{pv} : Largo del panel [m^2].

W_{pv} : Ancho del panel [m^2].

A continuación, se reemplazan los valores, teniendo:

$$A = (1,957 * 0,992) = 1,9413[m^2]$$

Al tener el valor del número de paneles y el área de cada uno de ellos, se aplica la ecuación 28, que permite identificar el área total de los paneles.

$$A_{pv} = N_{pv} * A \quad (\text{Ecuación 28})$$

Donde:

A_{pv} : Área total de los paneles.

N_{pv} : Número de paneles.

A : Área del panel.

Los valores son substituidos, dando como resultado:

$$A_{pv} = 5 * 1,9413 = 9,7067 [m^2]$$

Los sistemas de energía solar fotovoltaica cuentan con una ventaja, ya que al implementar baterías se puede almacenar la energía generada durante una cantidad de tiempo, para momentos en los que no hay suficiente energía solar. De igual forma, siendo un sistema off-grid es necesario realizar el dimensionamiento del regulador de carga, este permite controlar el voltaje y la corriente entre los paneles solares y las baterías, asegurando que las baterías se carguen correctamente, es decir, evitando sobrecargas o descargas excesivas.

Para ello, se toma el número de paneles ya calculado en la ecuación 26 y se multiplica por la corriente de corto circuito (I_{sc}) del panel que se observa en la tabla 17, al tener este cálculo se multiplica el resultado por el factor de seguridad usado al calcular el número de paneles.

$$I_{m\acute{a}x \text{ del sistema}} = N_{pv} \cdot I_{sc} \rightarrow 5 \cdot 11,1[A] = 55,5[A]$$

$$I_{regulador} = I_{m\acute{a}x \text{ del sistema}} \cdot f_s \rightarrow 55,5[A] \cdot 1,25 = 69,375[A]$$

Se realiza la búsqueda de un regulador con parámetros similares considerando que el voltaje de trabajo del sistema es de 24[V], teniendo como resultado un regulador de carga solar con las especificaciones que se encuentran en la tabla 18.

Tabla 18. Especificaciones técnicas regulador de carga solar.

Marca	Perfect Suitor
Voltaje Nominal	12/24[V]
Corriente	70[A]

A continuación, se realiza el dimensionamiento de las baterías necesarias para el sistema tal como se observa en la tabla 19, para ello se establece como demanda energética el valor de la energía de la carga encontrada en la tabla 16; la tensión del sistema es la misma tensión de trabajo de los paneles, tomando esto en cuenta para calcular la capacidad de la batería necesaria (C_{bn}) se aplica la ecuación 29.

$$C_{bn} = \frac{\text{Demanda energética} \cdot \text{Días de autonomía}}{\text{Tensión del sistema} \cdot \text{Profundidad de descarga}} \quad (\text{Ecuación 29})$$

Se identifica una batería comercial de referencia LiFePO4 y de su ficha técnica se determina la tensión y la capacidad de esta, seguido a esto se calcula el número de baterías en serie, usando la ecuación 30.

$$N^{\circ}_{bs} = \frac{\text{Tensión del sistema}}{\text{Tensión de la batería}} \quad (\text{Ecuación 30})$$

A su vez, se calcula la cantidad de baterías en paralelo, para ello se utiliza la ecuación 31.

$$N^{\circ}_{bp} = \frac{C_{bn}}{C_{bLiFePO4}} \quad (\text{Ecuación 31})$$

Como se puede ver en la tabla 19 el valor de las baterías en paralelo da un número con decimales, por lo que se aproxima a 2, luego se toma ese valor de baterías y se multiplica por la capacidad de la batería LiFePO4 ($C_{bLiFePO4}$).

Tabla 19. Dimensionamiento de las baterías.

Demanda energética	2.652	$\left[\frac{Wh}{día}\right]$
Tensión del sistema	24	$[V]$
Días de autonomía	1	$[días]$
Profundidad de descarga	0,6	$[-]$
Capacidad de la batería necesaria (C_{bn})	184,1666	$[Ah]$
Tensión de la batería LiFePO4	24	$[V]$
Capacidad de la batería LiFePO4 ($C_{bLiFePO4}$)	120	$[Ah]$
Nº baterías en serie	1	1
Nº baterías en paralelo	1,5347	2
Cantidad de baterías	2	
CAPACIDAD BATERIAS	240	$[Ah]$

Para el almacenamiento de energía del sistema solar fotovoltaico es necesario emplear 2 baterías, esto debido a que, si se eligiera el número de baterías en serie, la capacidad de esta no cubriría la capacidad de las baterías necesarias, esto porque se tendría una capacidad total de las baterías de 120 $[Ah]$ y la necesaria es de 184,1666 $[Ah]$, por lo que se decide tomar el número de baterías en paralelo, que si permiten abastecer la C_{bn} . En la tabla 20 se presentan las especificaciones técnicas de la batería propuesta.

Tabla 20. Especificaciones técnicas de la batería.

Batería de litio LiFePO4	
Peso	29 $[Kg]$
Capacidad	120 $[Ah]$
Número de ciclos al 80%	4.000
Potencia máxima	3.072 $[W]$

Para llevar a cabo el dimensionamiento del inversor, se toma en cuenta la potencia de consumo calculada en el cuadro de cargas de la tabla 16 y el factor de simultaneidad, para ello se realiza la multiplicación de estas dos variables, teniendo como resultado la potencia del inversor que se observa en la tabla 21.

Tabla 21. Dimensionamiento del inversor.

Potencia de consumo	1136	$[W]$
Factor de simultaneidad	0,7	
Potencia del inversor	795,2	$[W]$

El valor de la potencia del inversor se aproxima a 800 $[W]$, y se busca una referencia comercial en la que se encuentra un inversor solar de onda pura, en la tabla 22 se observan las especificaciones técnicas del mismo.

Tabla 22. Especificaciones técnicas del inversor.

Inversor solar de onda pura	
Potencia de salida	800 $[W]$
Potencia pico	1.500 $[W]$

Rango de tensión de entrada (VDC)	18,4 - 34 [V]
Eficacia máx.	90%
Dimensiones [cm]	10,5 x 21,6 x 30,5
Peso	5,5 [Kg]

A continuación, en la figura 6, se presenta el diagrama de bloques del sistema de energía solar fotovoltaico, que como se observa es off-grid y cuenta con los dispositivos ya dimensionados anteriormente, este sistema permite alimentar las luminarias del establo y de la casa, además de los electrodomésticos que se tienen dentro de la casa.

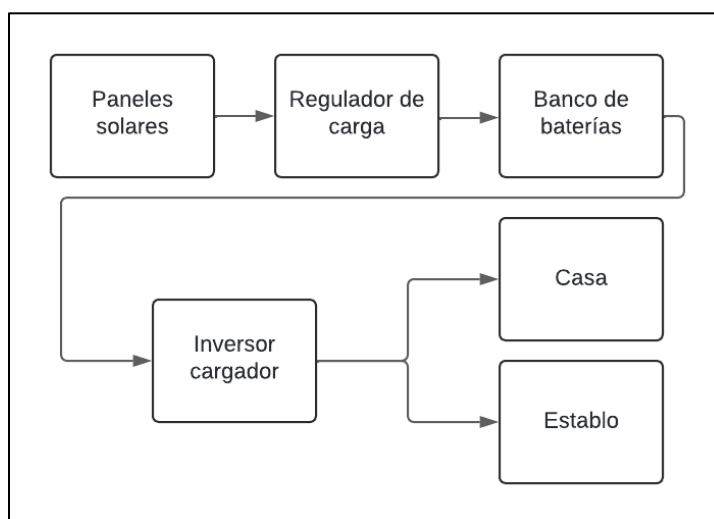


Figura 6. Diagrama de bloques sistema solar fotovoltaico.

5.3.2. Sistema de Biomasa.

Para realizar el dimensionamiento del biodigestor, es necesario tener en cuenta el volumen total que requiere, para ello cabe resaltar que para los biodigestores tubulares se establece que el 75% del volumen equivale a la fase líquida que corresponde al volumen del sustrato ingresado y el 25% a la fase gaseosa, es decir, al volumen de biogás generado [45], como se puede ver en la figura 7.

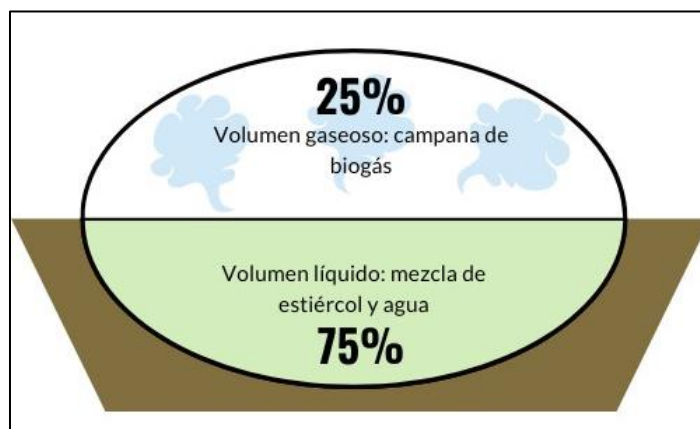


Figura 7. Esquema del biodigestor tubular, Tomado de: autores.

Teniendo la ecuación 32, y sabiendo que el volumen líquido $V_L = 0,75 \rightarrow 75\%$ y el $V_G = 0,25 \rightarrow 25\%$ se calcula la relación que se observa en la ecuación 33, lo cual permite determinar el volumen líquido del biodigestor teniendo en cuenta el volumen gaseoso calculado en [43], para ello se aplica la ecuación 34, esto posibilita encontrar el valor del volumen total por lo que se reemplazan los valores calculados teniendo como resultado que el $V_T = 4,1472 \left[\frac{m^3}{dia} \right]$.

$$V_T = V_L + V_G \quad (Ecuación 32)$$

$$\frac{V_L}{V_G} = \frac{0,75}{0,25} = 3 \quad (Ecuación 33)$$

$$V_L = 3V_G \rightarrow 3(1,0368) = 3,1104 \left[\frac{m^3}{dia} \right] \quad (Ecuación 34)$$

$$V_T = 3,1104 \left[\frac{m^3}{dia} \right] + 1,0368[m^3] = 4,1472 \left[\frac{m^3}{dia} \right]$$

Es necesario establecer la carga diaria de la mezcla del biodigestor tubular, teniendo la ecuación 35, se despeja obteniendo la ecuación 36.

$$V_L = Carga\ diaria * TRH \quad (Ecuación 35)$$

TRH :Tiempo de retención hidráulico

Tabla 23. Tiempo de Retención según la Temperatura, Tomado de [46].

Región característica	Temperatura [°C]	Tiempo de retención (TRH) [días]
Trópico	30	20
Valle	20	30
Altiplano	10	60

Para calcular la temperatura promedio (T_{AVG}), se usó el valor encontrado al aplicar Clustering, tal como se hizo para la hora y la irradiación, se desnormalizaron los tres centroides correspondientes a la temperatura, se sumaron y se dividieron entre la cantidad de clústeres (3), teniendo como resultado:

$$T_{AVG} = 28,46[°C]$$

Se tiene en cuenta la tabla 23 y el valor de T_{AVG} para estimar el tiempo de retención, por lo que aproxima esta temperatura al valor de temperatura del trópico que es de $30[°C]$, teniendo que el TRH hidráulico es de 20 días para esa temperatura.

$$\frac{V_L}{TRH} = Carga\ diaria \quad (Ecuación 36)$$

Luego se reemplazan los valores teniendo en cuenta que $1[m^3] \rightarrow 1.000 [L]$, obteniendo:

$$\frac{3,1104 \left[\frac{m^3}{\text{día}} \right] \left(\frac{1.000}{1} \right) \left[\frac{L}{m^3} \right]}{20 \text{ días}} = \text{Carga diaria}$$

$$\text{Carga diaria} = 155,52 [L]$$

La mezcla tiene una relación 3: 1, 3 partes de agua y 1 de estiércol, no se le pone más agua a la mezcla, porque está compuesta de estiércol de búfala y de becerros que al tomar leche expulsan el residuo líquido, por lo que no se le debe poner grandes cantidades de agua. Teniendo en cuenta esto y el valor calculado de la mezcla diaria se aplica la ecuación 37 para encontrar el valor requerido en la producción de estiércol.

$$\text{Carga de mezcla diaria} = (\text{Producción de estiércol}) * (1 + 3) \quad (\text{Ecuación 37})$$

Se despeja de la ecuación, la producción de estiércol y se reemplazan los valores teniendo:

$$\frac{155,52[L]}{(1 + 3)} = \text{Producción de estiércol}$$

$$\text{Producción de estiércol} = 38,88 [L]$$

Por su parte, al tener el volumen total $V_T \left[\frac{m^3}{\text{día}} \right]$, se debe determinar las dimensiones del biodigestor tubular, el polietileno tubular se vende en rollos, con un ancho de rollo que varía, este plástico se usa para carpas solares y también se vende en su forma tubular, al desarrollar biodigestores tubulares, es el ancho del rollo el que determina el diámetro de este, en el mercado se utilizan anchos de rollo, tales como se observan en la tabla 24.

Tabla 24. Parámetros según el ancho de rollo, Tomado de [46]

Ancho de rollo [m]	Perímetro de la circunferencia [m]	Radio [m]	Diámetro [m]
1	2	0,32	0,64
1,25	2,5	0,40	0,80
1,50	3	0,48	0,96
1,75	3,5	0,56	1,12
2	4	0,64	1,28

Los biodigestores son una manga de plástico, en el que su volumen total equivale al volumen de un cilindro $[m^3]$ que se calcula aplicando la ecuación 38.

$$V_T = \pi \cdot r^2 \cdot L \quad (\text{Ecuación 38})$$

siendo:

π : 3,1416

r : radio del tubo

L : longitud del biodigestor [m]

Inicialmente, se obtiene el valor de la sección eficaz ($\pi \cdot r^2$) para cada ancho de rollo como se observa en la tabla 25, para que de esta manera se pueda estimar la longitud necesaria para el volumen total que se tiene.

Tabla 25. Sección eficaz según el ancho de rollo.

Ancho de rollo [m]	Perímetro de la circunferencia [m]	Radio [m]	Diámetro [m]	Sección eficaz ($\pi \cdot r^2$) [m ²]
1	2	0,32	0,64	0,32
1,25	2,5	0,40	0,80	0,50
1,50	3	0,48	0,96	0,72
1,75	3,5	0,56	1,12	0,97
2	4	0,64	1,28	1,27

Teniendo el volumen total del biodigestor $V_T = 4,1472 \left[\frac{m^3}{dia} \right]$ y las secciones eficaces de cada ancho de rollo, se despeja la longitud de la ecuación 38, teniendo como resultado la ecuación 39, la cual se aplica reemplazando los valores que se tienen en la tabla 25 y el valor del V_T , teniendo como resultado los valores observados en la tabla 26.

$$L = \frac{V_T}{(\pi \cdot r^2)} \quad (\text{Ecuación 39})$$

Tabla 26. Longitud del biodigestor según el ancho de rollo.

Ancho de rollo [m]	Perímetro de la circunferencia [m]	Radio [m]	Diámetro [m]	Sección eficaz ($\pi \cdot r^2$) [m ²]	Longitud del biodigestor [m]
1	2	0,32	0,64	0,32	12,96
1,25	2,5	0,40	0,80	0,50	8,2944
1,50	3	0,48	0,96	0,72	5,759
1,75	3,5	0,56	1,12	0,97	4,275
2	4	0,64	1,28	1,27	3,265

Teniendo en cuenta la tabla 26 se puede tener distintas longitudes y anchos de rollo con los que se alcanza el volumen total deseado, los anchos de rollo más grandes requieren de una menor longitud para alcanzar el volumen deseado, no es conveniente tener biodigestores muy grandes o pequeños, esto debido a que los biodigestores demasiado cortos pueden generar un flujo de efluente inestable y una digestión incompleta, mientras que si son demasiado largos pueden presentar problemas de mezclado y retención de gas, para que esto no ocurra en [46] se establece una relación óptima entre el diámetro y la longitud que es 7.

Por lo que aplicando la ecuación 40, se debe seleccionar las dimensiones del biodigestor que más se acerquen a una relación de 7, esta relación es un tanto flexible en un rango de [5 - 10], siendo la óptima igual a 7.

$$\frac{L}{d} = \text{entre 5 a 10 (óptimo 7)} \quad (\text{Ecuación 40})$$

Tabla 27. Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor.

Ancho de rollo [m]	Perímetro de la circunferencia [m]	Radio [m]	Diámetro [m]	Sección eficaz ($\pi \cdot r^2$) [m ²]	Longitud del biodigestor [m]	$\frac{L}{d}$ entre 5 a 10 (óptimo 7)
1	2	0,32	0,64	0,32	12,96	20,25
1,25	2,5	0,40	0,80	0,50	8,2944	10,368
1,50	3	0,48	0,96	0,72	5,759	5,9989
1,75	3,5	0,56	1,12	0,97	4,275	3,8169
2	4	0,64	1,28	1,27	3,265	2,5507

Como se puede observar en la tabla 27, hay un solo valor que se ajusta al rango de 5-10 de la relación $\frac{L}{d}$ y es para un ancho de rollo de 1,5 [m], lo que equivaldría a que el biodigestor debe tener una longitud aproximada de 6 [m] de largo.

Es necesario conocer las dimensiones de la zanja en donde se instalará el plástico tubular, la longitud de la zanja se determina por la longitud del biodigestor, la profundidad y ancho de la misma que dependen del ancho de rollo ya calculado, de forma general, se toma en cuenta la tabla 28 para determinar las dimensiones de la zanja.

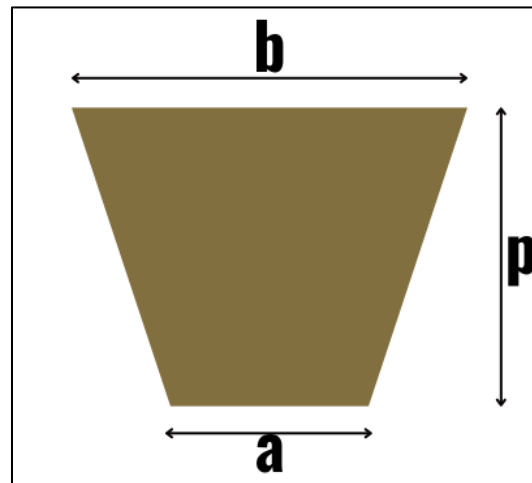


Figura 8. Dimensiones de la zanja, Tomado de: [46].

Tabla 28. Dimensiones de la zanja según el ancho de rollo, Tomado de: [46]

AR [m]	2	1,75	1,5	1,25	1
a[m]	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
b[m]	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
p[m]	1	0,9	0,8	0,7	0,6

Teniendo en cuenta la tabla 28 y el ancho de rolo ya identificado anteriormente, se determinan las dimensiones de la zanja requeridas para alcanzar el volumen total esperado.

$$AR[m] = 1,5; a[m] = 0,5 \quad b[m] = 0,7 \quad p[m] = 0,8$$

Considerando a [46] se debe tener presente que al instalar el biodigestor tubular en la zanja, las paredes de esta sustentarán toda la presión del volumen líquido del biodigestor; la cúpula de biogás corresponde al 25% del volumen total y se encuentra ubicada en la parte superior, como se observa en la figura 7, si se llegase a construir una zanja sin tener las consideraciones de las dimensiones y los demás cálculos realizados anteriormente, puede llegar a suceder que la cúpula de biogás sea demasiado pequeña o grande, y en caso de que ocupe más del 25% del volumen, se estará restando volumen a la fase líquida y eso reduciría el tiempo de retención.

Es importante que al realizar la instalación se ubique a la salida del biodigestor la válvula de seguridad y el reservorio cerca de la cocina, pero no cerca del fuego, debido a que este reservorio es en donde se almacena el biogás, para luego ser usado, la longitud del reservorio es igual a la mitad de la del biodigestor, es decir, igual a 3 [m] de largo e igual de ancho al biodigestor.

Para realizar el dimensionamiento del sistema es necesario tener en cuenta un generador de biogás, en este caso se selecciona el CC700-MG que tiene las características técnicas que se observan en la tabla 29, este tipo de generadores convierten el biogás generado a partir de la descomposición de la materia orgánica en el biodigestor en electricidad, además de proporcionar constantemente energía eléctrica, ya que el proceso de digestión anaerobia es continuo y en este sistema el biodigestor se alimenta una vez al día todos los días.

Tabla 29. Características técnicas del generador de biogás CC700-MG.

Generador CC700-MG			
Frecuencia [Hz]	50/60	Tipo de motor	Cilindro único, 4 tiempos, OHV, enfriado por aire forzado
Tensión Nominal de Salida [V]	230[V]	Diámetro del cilindro del motor x Longitud del recorrido del pistón dentro del cilindro [mm]	54x38
Potencia de Funcionamiento [kW]	0,6	Desplazamiento [cc]	87
Potencia máxima [kW]	0,7	Método de inicio	Solo arranque por retroceso
Salida DC	12[V]/ 8,3[A]	Sistema de encendido	T.C. I
Tipo de alternador	Sincronización AC monofásica con escobilla	Capacidad de aceite del motor [L]	0,35
Modelo del motor	CC154F-MG	Consumo de combustible	0,84 $\left[\frac{m^3}{h}\right]$

A continuación, en la figura 9, se observa el diagrama de bloques del sistema de biogás, este es off-grid es decir que no está conectado a la red, como se puede observar este sistema además de producir el biogás necesario para alimentar el generador y convertirlo en energía eléctrica, genera una producción de biofertilizante que podría aprovecharse para abonar los cultivos de la finca y los pastos de corte que se usan para alimentar a las búfalas y los becerros, debido a la capacidad del sistema se logra alimentar una estufa de inducción eléctrica.

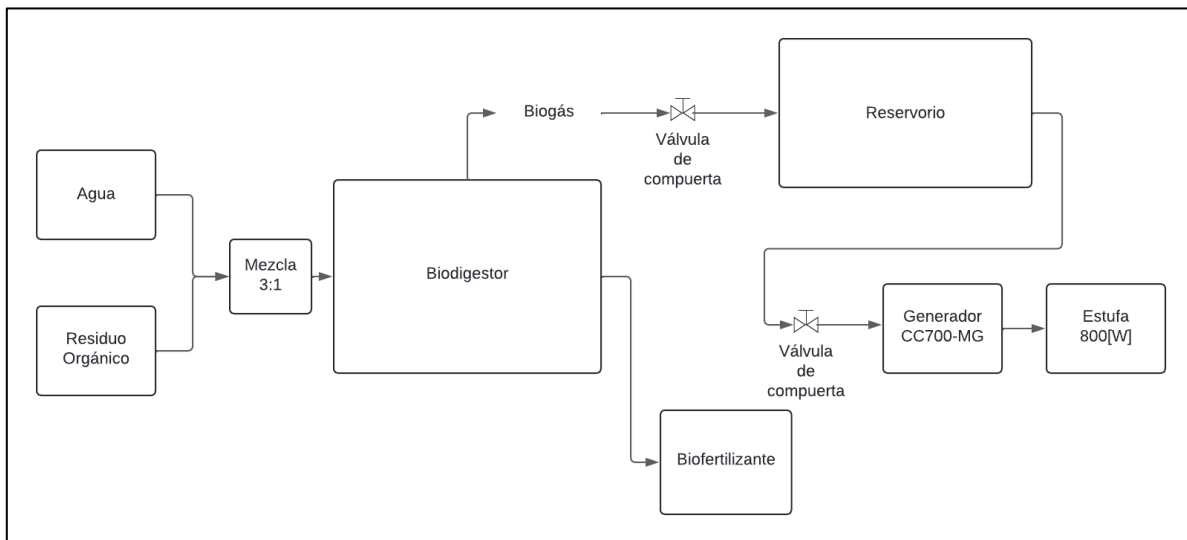


Figura 9. Diagrama de bloques sistema de biomasa.

5.4. Fase 4. Evaluación de la prefactibilidad técnica del diseño conceptual de una microrred híbrida.

Las métricas de desempeño en sistemas híbridos de energía solar fotovoltaica y biomasa permiten evaluar la eficiencia y la efectividad en estos sistemas de energía, estas proporcionan información valiosa sobre el funcionamiento del sistema, su rendimiento y su capacidad para cumplir con el objetivo establecido, permite a los propietarios evaluar, optimizar el rendimiento del sistema y encontrar posibles áreas de mejora en el mismo.

5.4.1. Factor de Capacidad (CF).

El Factor de Capacidad es una medida que representa la eficiencia de un sistema de generación de energía en un periodo de tiempo específico.

➤ Sistema solar fotovoltaico.

El Factor de Capacidad tiene en cuenta los factores que pueden disminuir la producción real de la planta fotovoltaica con respecto a la producción ideal. Los valores típicos del Factor de Capacidad para la generación fotovoltaica se encuentran en el rango de: [10; 30] [%]. [37]

Para realizar el cálculo del factor de capacidad del sistema fotovoltaico, es necesario aplicar la ecuación 1, en esta se toma en cuenta el valor de la irradiación calculada en la ecuación 17 de la sección 5.2.1.

$$CF(\%) = \left[\frac{I * A_{pv}}{E_N} \right] \quad (\text{Ecuación 41})$$

I : Irradiación $\left[\frac{Wh}{m^2}\right]$

A_{pv} : Área total de los paneles $[m^2]$

E_N : Energía de la carga

En este caso el área total ya se calculó en la ecuación de la sección 5.3.1 y la energía de la carga se calcula en el cuadro de cargas de la tabla 16, se reemplazan esos valores en la ecuación 41.

$$CF(\%) = \left[\frac{4.810,2819 \left[\frac{Wh}{m^2}\right] * 9,7067[m^2]}{2.652[Wh]} \right]$$

$$CF(\%) = 17,6063\%$$

Se obtiene un valor de $CF(\%) = 17,6063\%$, lo cual según [37] se encuentra dentro del rango, esto indica que el sistema solar fotovoltaico está produciendo energía de manera eficiente y en la cantidad esperada.

➤ Sistema biomasa.

Para calcular el Factor de capacidad para el sistema de biomasa, es necesario realizar el cuadro de cargas de los equipos que se van a alimentar, tal como se observa en la tabla 30.

Tabla 30. Cuadro de Cargas para Biomasa.

Cantidad	Equipo	Ubicación	Potencia [kW]	Horas de uso	Energía [kWh]
1	Estufa	Cocina	0,8	1,2342	0,9874
				E_N	0,9874

Se aplica la ecuación 1 que permite obtener el porcentaje del factor de capacidad, en donde para calcular la energía de la fuente se aplica la ecuación 42 en la que se toma el valor de las horas de uso calculadas en la ecuación 24 de la sección 5.2.2 y la potencia de funcionamiento [kW] del generador de biogás, este valor se encuentra en la tabla 29, teniendo:

$$E_F = \text{Horas de uso} \cdot \text{Potencia de funcionamiento} \quad (\text{Ecuación 42})$$

$$E_F = 1,2342[h] * 0,6[kW] = 0,7405[kWh]$$

El valor de la energía de la carga, ya se conoce, es el correspondiente al cuadro de cargas de la tabla 30, teniendo esos valores se reemplaza en la ecuación.

$$CF(\%) = \left[\frac{0,7405}{0,9874} \right] \cdot 100\% = 75\%$$

Tomando en cuenta a [47] un Factor de Capacidad para biomasa puede variar entre el 50 % y el 95%, por lo que en este caso un CF del 75%, indica que el sistema puede operar de manera eficiente y generar la mayor parte de la energía esperada, es un sistema estable debido a que no depende de factores climáticos, permitiendo que el sistema sea sostenible y sustentable.

5.4.1. Relación de Desempeño (PR).

Esta métrica permite evaluar el rendimiento de un sistema, toma en cuenta la energía eléctrica real generada durante un tiempo específico, y permite tener factores de corrección o de mejora.

➤ Sistema solar fotovoltaico.

Para calcular el PR en el sistema solar fotovoltaico se aplica la ecuación 2, en donde se utilizan algunos parámetros ya calculados en el dimensionamiento, para ello es necesario realizar modificaciones a la ecuación inicial, teniendo como resultado la ecuación 43, en la que se toma en cuenta las pérdidas del rendimiento global de la instalación.

$$PR(\%) = \frac{\frac{E_N}{A_{pv}}}{R \cdot P_{pv} \cdot HSP \cdot \left(\frac{N_{pv}}{A_{pv}} \right)} \cdot 100[\%] \quad (\text{Ecuación 43})$$

En donde:

E_N : Energía de la carga, calculada en la tabla 16.

A_{pv} : Área total de los paneles, obtenida en la ecuación 24.

R : Rendimiento de la instalación fotovoltaica.

P_{pv} : Potencia Nominal del panel, encontrada en la tabla 17.

N_{pv} : Número de paneles, determinado en la ecuación 26.

Se toman los valores de las variables indicadas anteriormente y se reemplazan en la ecuación, tal como se muestra a continuación.

$$PR(\%) = \frac{\frac{2.652 [Wh]}{9,7067 [m^2]}}{0,65 \cdot 270 [W] \cdot 4,8102 \cdot \left(\frac{5}{9,7067 [m^3]}\right)} = 0,6282$$

$$PR(\%) = 62,82\%$$

Esta relación de desempeño para ser una solución realista se debe encontrar entre un rango de [0,6; 0,8] pero si se encuentra entre [0,8; 0,9] el sistema tiende a ser ideal, teniendo en cuenta a [48] si esta métrica se encuentra por encima del 90% el sistema se consideraría demasiado ideal por lo que su validez podría ser cuestionada y al implementarse la solución podría no ser viable.

➤ Sistema biomasa.

Por su parte para calcular esta métrica para el sistema de biomasa, se realizan ajustes a la ecuación 2, teniendo como resultado la ecuación 44, en esta se toman en cuenta algunos parámetros ya calculados y se busca conseguir evaluar al sistema.

$$PR(\%) = \frac{\frac{\text{Poder calorífico} \cdot 1.000}{\text{Tiempo de facturación}}}{DPB \cdot \text{Horas de uso}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 44})$$

Teniendo:

Poder calorífico: Indica el poder calorífico del gas natural, viene dado en la factura de la luz, $\text{Poder calorífico} = 11,98 \left[\frac{kWh}{m^3} \right]$

Tiempo de facturación: Es el tiempo estimado de entrega de los recibos, es decir, cada mes o 30 días.

DPB: Densidad de potencia de biomasa $\left[\frac{W}{m^3} \right]$

Horas de uso: [h]

En este caso, las horas de uso y la densidad de potencia de biomasa, ya se habían calculado, por lo que se toman estos valores y se rempazan, teniendo como resultado

$$PR(\%) = \frac{\frac{11,98 \left[\frac{kWh}{m^3} \right] \cdot 1.000}{30}}{421,7123 \left[\frac{W}{m^3} \right] \cdot 1,2342[h]} \cdot 100 = 76,72\%$$

La relación de desempeño en biomasa indica que cuanto mayor sea el PR el sistema es más eficiente al utilizar la energía disponible, un porcentaje de 76,72% podría apuntar a que el sistema convierte la energía almacenada de biomasa en energía útil de manera efectiva, lo que permite que la solución sea sostenible; es importante evaluar el PR de un sistema de biomasa debido a que proporciona información sobre el rendimiento del sistema, lo que puede influir en el diseño, operación y mantenimiento del mismo.

5.4.2. Relación de Producción (Yr).

- Sistema solar fotovoltaico.

Para estimar la relación de producción del sistema solar fotovoltaico, se utiliza la ecuación 45, en la que se toma en cuenta el HSP o horas solar pico, este valor ya se estimó en la sección 5.3.1.

$$Yr = HSP \quad (Ecuación 45)$$

HSP: Horas de sol pico.

$$Yr = 4,8102 [h]$$

Este Yr hace referencia a la cantidad de tiempo en la que se encuentran en operación los paneles durante el día generando energía en función de las condiciones climáticas y de la eficiencia del sistema.

- Sistema biomasa.

Por su parte, para encontrar la relación de producción de la solución de biomasa, se toma en cuenta el volumen gaseoso calculado en [43] y el valor de consumo de combustible del generador de biogás CC700-MG que se especifica en la tabla 29.

$$Yr = \frac{V_G}{\text{Consumo de combustible}} \quad (Ecuación 46)$$

Se sustituyen los valores en la ecuación 46, tal como se observa a continuación.

$$Yr = \frac{1,0283[m^3]}{0,84 \left[\frac{m^3}{h} \right]} = 1,2342[h]$$

En este caso el Yr se refiere a la cantidad de tiempo de funcionamiento del sistema en conjunto o a las horas de generación de energía utilizable, desde la alimentación de la mezcla al biodigestor para su procesamiento, hasta el tiempo durante el cual el generador de biogás está produciendo electricidad a partir del biogás almacenado en el reservorio.

6. Conclusiones

El preprocesamiento de los datos de energía solar fotovoltaica se llevó a cabo mediante el uso de la normalización Mín-Máx, debido a que esto permitió ajustar los datos dentro de un mismo rango que va de 0 a 1 para de esta manera aplicar la técnica de distribución. Para los datos de biomasa fue necesario realizar un proceso de conversión digital/analógico, que permitió eliminar los datos atípicos y caracterizar el sensor MQ-4, lo que permitió encontrar los valores de metano que se generan diariamente en el biodigestor.

Es importante mencionar que se notó que los datos tomados por el IDEAM en comparación con los de la NASA son más precisos, puesto que las estaciones meteorológicas del IDEAM son instaladas en tierra y las de la NASA son estaciones satelitales, sin embargo, como se pudo evidenciar el acceso a los datos del IDEAM es restringido mientras que los de la NASA son abiertos al público y permiten acceder a distintas variables enfocadas a diferentes recursos energéticos de cualquier lugar del mundo.

La caracterización del conjunto de datos preprocesados en el caso de la energía solar fotovoltaica se hizo aplicando Clustering, lo que permitió identificar los patrones presentes en el conjunto de datos y correlacionar las variables de interés, para ello se utilizó el método del codo con el cual se identifican el número óptimo de clusters y a partir de esto se aplicó regresión cuadrática encontrando el polinomio característico del área bajo la curva o la irradiación solar. Por su parte en los datos de biomasa fue necesario emplear conversiones a partir de las cuales se aplicó la relación de $[m_{CH_4}^3 h]$ y $[Wh]$ obteniendo la Densidad de Potencia (DPB) $\left[\frac{W}{m^3}\right]$.

El dimensionamiento conceptual de la microrred se realizó a partir del cuadro de cargas para energía solar fotovoltaica teniendo en cuenta que la solución es off-grid, para la parte de biomasa se calcula el dimensionamiento del biodigestor tomando en consideración el volumen gaseoso disponible, lo que permite según los anchos de rollo determinar el tamaño de la zanja donde se debe ubicar el biodigestor, se presenta diagrama de bloques de las dos soluciones en donde se contempla una energía de carga distinta para cada recurso, estas soluciones energéticas se consideran sostenibles, debido a que se buscó implementar la menor cantidad de elementos posibles, además de que los dos recursos son renovables.

La prefactibilidad técnica del diseño conceptual de la microrred se evaluó mediante las métricas de desempeño, las cuales se aplicaron a cada recurso por separado, el factor de capacidad compara la energía producida por un sistema con la cantidad de energía que podría producir si funciona a plena capacidad, un factor de capacidad alto indica que la solución produce energía de manera constante, por lo que en este contexto un alto factor de capacidad se considera como un indicador positivo de la prefactibilidad técnica para la implementación de una microrred.

Por su parte la relación de desempeño compara la cantidad de energía producida por el sistema con la cantidad de energía que se espera producir, esta métrica permite identificar desviaciones en el rendimiento del sistema lo que puede ser útil para ajustar y optimizar la solución; los valores determinados para la microrred indican que son sistemas realistas que pueden llegar a ser sostenibles y permiten identificar posibles áreas de mejora.

Finalmente, la relación de producción para energía solar fotovoltaica indica que la instalación produjo energía equivalente a su capacidad instalada durante aproximadamente 4,8102[h] lo cual indicaría que la solución tiene un buen rendimiento, para la parte de la solución energética de la biomasa, esta métrica señala que la instalación produjo energía equivalente a su capacidad instalada durante 1,2342 [h].

7. Trabajos futuros

- Implementación de sistemas híbridos en los que se integren distintos recursos energéticos y se evalúe la prefactibilidad del sistema unificado por medio de las métricas de desempeño.
- Emplear el software Homer Energy para realizar gestión energética de diversos recursos.

8. Referencias Bibliográficas

- [1] M. C. RAMOS-CÁRDENAS, D. C. HERNÁNDEZ-CIPAMOCHA, H. Y. PÉREZ-ARENAS, and E. SIERRA-CÁRDENAS, “Análisis Y Perspectivas De La Implementación De Tecnologías Limpias Para La Generación De Energía En Colombia,” *I3+*, vol. 4, no. 2, pp. 23–42, 2022, doi: 10.24267/23462329.941.
- [2] Mi. de M. y Energía, “Funcionamiento del Sector ¿ Cómo está integrado el sector eléctrico colombiano ?” [Online]. Available: <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-2/funcionamiento-del-sector/>
- [3] UPME, “Ley 143 de 1994 (Julio 11),” no. 41. 1994. [Online]. Available: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=4631
- [4] L. Republica, “La Republica.Pdf,” Mar. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.larepublica.co/especiales/el-apagon-de-1992-1993/cerca-de-97-de-los-colombianos-tiene-acceso-a-la-energia-electrica-segun-minenergia-3565120#:~:text=del año pasado.-,Aún así%2C hay más de 400.000 hogares s>
- [5] UPME, “Unidad de planeacion Minero Energética.” p. 3. [Online]. Available: http://www.upme.gov.co/Normatividad/Proyectos/PROYECTO_RESOLUCION_julio_2011_1.pdf
- [6] UPME, “Potencial energético departamental de la biomasa residual,” *Atlas del Potencial Energ. la Biomasa Residual en Colomb.*, vol. Anexo E, pp. 155–172, 2007.
- [7] D. Cardozo and K. Sánchez, “Diseño de un sistema fotovoltaico aislado para la generación de energía eléctrica en escuelas rurales de Norte de Santander Design of an isolated photovoltaic system for the generation of electric power in Rural Schools of Norte de Santander,” vol. 2, no. 1, pp. 50–66, 2017, [Online]. Available: <http://gis.unicafam.edu.co/index.php/gis/article/view/43/74>
- [8] ONU, “Metano.pdf.” [Online]. Available: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/video/por-que-se-habla-tanto-del-metano>
- [9] G. Carvajal-Romo, M. Valderrama-Mendoza, D. Rodríguez-Urrego, and L. Rodríguez-Urrego, “Assessment of solar and wind energy potential in La Guajira, Colombia: Current status, and future prospects,” *Sci. Direct*, vol. 36, p. 15, 2019, doi: 10.1016/j.seta.2019.100531.
- [10] P. Magazine, “Termotasajero.pdf.” 2023. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine-latam.com/2023/01/17/entra-en-operacion-en-colombia-la-planta-termotasajero-dos-solar-de-52-mw/>
- [11] M. de A. y D. Sostenible, “Flujo de Biomasa.pdf.” [Online]. Available: <https://economiacircular.minambiente.gov.co/index.php/lineas-de-accion/flujo-de-biomasa/>
- [12] G. López Martínez, C. Buriticá Arboleda, and E. Silva Lora, “La biomasa residual pecuaria como recurso energético en Colombia,” *Visión electrónica*, 2018, doi: 10.14483/22484728.14066.
- [13] L. Republica, “La oferta hidráulica equivale a cerca de 69% de la matriz energética del país.” 2019. [Online]. Available: <https://www.larepublica.co/especiales/minas-y-energia-marzo-2019/la-oferta->

- hidraulica-equivale-a-cerca-de-69-de-la-matriz-energetica-del-pais-2842181
- [14] D. N. de Planeación, "Objetivos de Desarrollo Sostenible (7)." <https://ods.dnp.gov.co/es/objetivos/energia-asequible-y-no-contaminante>
 - [15] E. P. Nacional, "El Plan Nacional de Desarrollo marca la transición energética del país," 2023.
 - [16] Gobernacion de Santander, "Plan de desarrollo de Santander 2020-2023," vol. 4, no. 1, pp. 1–23, 2020.
 - [17] I. Granit, "What makes Colombia's indigenous peoples adopt microgrids? Social acceptance and financial constraints in renewable energy diffusion," *Sci. Direct*, vol. 101, 2023, doi: 10.1016/j.erss.2023.103132.
 - [18] C. Granados, M. Castañeda, S. Zapata, F. Mesa, and A. J. Aristizábal, "Feasibility analysis for the integration of solar photovoltaic technology to the Colombian residential sector through system dynamics modeling," *Energy Reports*, vol. 8, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.01.154.
 - [19] A. Sagastume Gutiérrez, J. J. Cabello Eras, L. Hens, and C. Vandecasteele, "The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia," *J. Clean. Prod.*, vol. 269, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122317.
 - [20] G. Narvaez, L. F. Giraldo, M. Bressan, and A. Pantoja, "The impact of climate change on photovoltaic power potential in Southwestern Colombia," *Heliyon*, vol. 8, no. 10, p. e11122, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11122.
 - [21] M. V. Chamorro, E. E. Blanco, and J. P. Rojas, "Direct, diffuse and total solar radiation data set in La Guajira, Magdalena and Cesar departments - Colombia," *Data Br.*, vol. 33, p. 106397, 2020, doi: 10.1016/j.dib.2020.106397.
 - [22] C. M. M. Rocha, J. D. Pertuz Ortiz, and N. A. Rodriguez Ibanez, "A Diffuse Analysis Based on Analytical Processes to Prioritize Barriers in the Development of Renewable Energy Technologies in Alignment with the United Nations Sustainable Development Goals: Evidence from Guajira/Colombia," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 13, no. 4, pp. 481–495, 2023, doi: 10.32479/ijeepp.14380.
 - [23] C. P. Pérez-Rodríguez, L. A. Ríos, C. S. Duarte González, A. Montaña, and C. García-Marroquín, "Harnessing Residual Biomass as a Renewable Energy Source in Colombia: A Potential Gasification Scenario," *Sustain.*, vol. 14, no. 19, pp. 1–14, 2022, doi: 10.3390/su141912537.
 - [24] A. M. Rosso-Cerón, D. F. León-Cardona, and V. Kafarov, "Soft computing tool for aiding the integration of hybrid sustainable renewable energy systems, case of Putumayo, Colombia," *Renew. Energy*, vol. 174, pp. 616–634, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.04.106.
 - [25] L. F. Mulcué-Nieto, L. F. Echeverry-Cardona, A. M. Restrepo-Franco, G. A. García-Gutiérrez, F. N. Jiménez-García, and L. Mora-López, "Energy performance assessment of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic modules in the tropical mountain climate: The case for Manizales-Colombia," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 2828–2835, 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2020.09.036.
 - [26] L. Montoya-Duque, S. Arango-Aramburo, and J. Arias-Gaviria, "Simulating the effect of the Pay-as-you-go scheme for solar energy diffusion in Colombian

- off-grid regions,” *Energy*, vol. 244, p. 123197, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123197.
- [27] M. S. Hossain and M. F. Rahman, “Hybrid solar PV/Biomass powered energy efficient remote cellular base stations,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 329–342, 2020, doi: 10.20508/ijrer.v10i1.10542.g7911.
- [28] J. Carreño, J. Anzures, and G. Tinoco, “Research Facilities for Renewable Energy Management Considering Distributed Generation based on Microgrids,” *Ieee*, vol. 2020, no. Ropec 2019, pp. 1–6, 2019.
- [29] R. J. Macías *et al.*, “Evaluation of the performance of a solar photovoltaic - Biomass gasifier system as electricity supplier,” *Energy*, vol. 260, no. December 2021, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.125046.
- [30] J. C. B. Hernández, C. Moreno, A. Ospino-Castro, C. Robles-Algarín, and J. Tobón-Perez, “A hybrid energy solution for the sustainable electricity supply of an irrigation system in a rural area of zona bananera, colombia,” *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 11, no. 4, pp. 521–528, 2021, doi: 10.32479/ijeep.11014.
- [31] Y. A. Munoz M, M. De Los Angeles Pinto C., and M. A. De La Rosa G, “Sizing of an island microgrid using demand side management strategies,” *Int. Conf. Electr. Comput. Commun. Mechatronics Eng. ICECCME 2021*, no. October, pp. 7–8, 2021, doi: 10.1109/ICECCME52200.2021.9590908.
- [32] Ó. G. B. Monsalve and J. M. Téllez, “Contaminación ambiental por ondas electromag- néticas no ionizantes producto de tecnologías inalámbricas en ambientes al aire libre,” vol. 8, no. 2, pp. 57–72, 2018.
- [33] O. Mart and M. I. Gonz, “Sistemas de almacenamiento energético mecánico en el mundo de la automoción,” 2014.
- [34] D. E. L. A. Biomasa and D. E. L. O. S. Residuos, “Energía de la biomasa y de los residuos sólidos 18.1.,” *Energía La Biomasa Y Los Residuos Sólidos*, pp. 413–450.
- [35] A. M. González Cabrera, “Biogás digester,” *Biogás*, pp. 22–36, 2014, [Online]. Available: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70603/fichero/3.+la+digestion+anaerobia.pdf>
- [36] G. Moncayo Romero, “¿Que Es El Biogás?,” *AQUA Limpia Eng.*, pp. 1–11, 2017.
- [37] F. C. Mart, J. Mar, and I. L. Bravo, “Sistemas de Energía Térmica Análisis del Performance Ratio en Instalaciones Fotovoltaicas,” 2013.
- [38] D. Singh and B. Singh, “Investigating the impact of data normalization on classification performance,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 97, p. 105524, 2020, doi: 10.1016/j.asoc.2019.105524.
- [39] V. Guralnik and G. Karypis, “A scalable algorithm for clustering sequential data,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Data Mining, ICDM*, pp. 179–186, 2001, doi: 10.1109/icdm.2001.989516.
- [40] D. A. Alvarado-Ruiz, “Caracterizacion del crecimiento de colonias bacterianas utilizando segmentacion de imagenes con K-means,” 2023.
- [41] I. D. E. Hidrologia and M. Y. Estudios, “FICHA METODOLÓGICA OPERACIÓN ESTADÍSTICA VARIABLES METEOROLÓGICAS Subdirección de Meteorología,” 2019.

-
- [42] NASA, "NASA POWER Data Viewer." <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [43] G. Z. LOZA and J. S. G. AGUILAR, "IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE BUFALOS EN EL MUNICIPIO DE RIONEGRO, SANTANDER," vol. 7, no. 3, p. 76, 2021.
- [44] C. R. Mendivelso Cuellar and R. D. Rodríguez Pico, "Diseño de un Sistema de Medición de Variables para un Proceso de Biodigestión," pp. 1–77, 2022.
- [45] A. C. Lozano Ruíz, C. A. Sánchez Montealegre, and J. G. Ardila Marín, "Evaluación del potencial de generación de biogás de un biodigestor de excremento vía simulación con el software SIMBA®," *Ingeniería y Región*, vol. 24, pp. 72–85, 2020. doi: 10.25054/22161325.2779.
- [46] G.- Energ, *Manual Biodigestores-familiares*.
- [47] Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, "REPORTE DE ANÁLISIS ECONÓMICO SECTORIAL SECTOR ELECTRICIDAD -Año 9-Nº 16," pp. 1–20, 2020, [Online]. Available: www.osinergmin.gob.pe
- [48] D. A. R. Barkhouse, O. Gunawan, T. Gokmen, T. K. Todorov, and D. B. Mitzi, "Yield predictions for photovoltaic power plants: empirical validation, recent advances and remaining uncertainties," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 20, no. 1, pp. 6–11, 2015, doi: 10.1002/pip.