



Universidad del  
**Rosario**

Escuela de Ciencias  
e Ingeniería

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE SISTEMAS DE  
AUTOGENERACIÓN A PEQUEÑA ESCALA, CON  
FUENTES RENOVABLES (SOLAR FOTOVOLTAICA  
Y BIOMASA) PARA SUPLIR LA DEMANDA  
ENERGETICA DE LA FINCA VILLA MERCEDES, EN  
EL MUNICIPIO DE PALERMO EN EL HUILA**

Presentado para obtener el título de

**MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES**

Sabrina Salome Sanjuanelo Salas

César José Ortiz Sabogal

Dirección:

Jesús Antonio Vega Uribe

Codirección:

Pedro José Arias Monje

Universidad del Rosario

Escuela de Ciencias e Ingeniería

Maestría en Energías Renovables

## **DEDICATORIA**

Agradezco a Dios Padre por darme la oportunidad de alcanzar otro logro más.

A mi compañera de vida Mónica María Rouille que con su amor y con su apoyo incondicional me ha dado fuerzas para alcanzar mis sueños.

A mis hijos, Juan José y Luciana, ustedes son mi más grande triunfo y son la fuente de mi alegría y de orgullo.

**César José Ortiz Sabogal**

A Dios, por ser el faro en la niebla, por regalarme la salud, la sabiduría y la fuerza necesaria para no desfallecer. Gracias por tu guía silenciosa en cada paso incierto, por sostenerme en los momentos de duda, por ser presencia constante en este viaje.

A mi madre, Esperanza Salas, porque en su amor hallé impulso y en su fe la certeza de que todo era posible. Gracias por tus palabras, por tu abrazo oportuno, por enseñarme que rendirse nunca es una opción. Este logro también es tuyo porque fuiste raíz y alas en este viaje.

A mi abuelita, Alejandrina Ortiz de Salas, por enseñarme que la constancia florece aún en los suelos más difíciles. Gracias por ser mi abrigo, por tu voz serena, por tus brazos que siempre fueron mi refugio. Tu amor fue mi norte y tu presencia, la calma que me sostuvo hasta el final.

Y a mi abuelito, Armando Salas, que ahora me acompaña desde el cielo. De ti aprendí la calma, la paciencia y el valor de soñar en grande. Cada proyecto que nace en mí lleva tu huella, porque en cada paso pienso en ti. Has sido mi motor para no rendirme, para seguir esforzándome, para ser mejor. A ti te debo tanto y esta meta también te pertenece.

**Sabrina Salome Sanjuanelo Salas**

## **AGRADECIMIENTOS**

Con profundo respeto queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a Don Luis María Rouille Tamayo, por permitirnos conocer la finca Villa Mercedes en el municipio de Palermo-Huila, por ser nuestra guía y por compartir su conocimiento acerca del mundo de la ganadería y del campo, gracias por la paciencia que tuvo para enseñarnos y sobre todo por la confianza en nosotros.

A nuestros profesores de maestría Jesús Antonio Vega Uribe (director) y Pedro Jose Arias Monje (codirector) por las enseñanzas y el apoyo para lograr terminar este proyecto tan especial.

## ABSTRACT

### **Español**

Este trabajo evaluó comparativamente la viabilidad técnica y económica de dos sistemas de autogeneración a pequeña escala (solar fotovoltaica y biomasa) para poder suplir la demanda energética de la finca Villa Mercedes en Palermo, Huila. El estudio partió de un diagnóstico en el cual se identificó un incremento del 171,5% en la demanda energética (pasando de 88 a 239 kWh/mes) debido a la tecnificación proyectada de procesos cárnicos y lácteos.

Mediante la caracterización de recursos, se determinó un potencial solar de 5,45 HSP y una disponibilidad de 108 kg/día de estiércol bovino. Con base en estos datos, se dimensionó un sistema fotovoltaico de 2,34 kWp y un sistema de biodigestión de 12,06 m<sup>3</sup> con un motogenerador de 1 kW.

Los resultados demuestran que el sistema solar fotovoltaico bajo configuración on-grid logra cubrir el 100 % de la demanda anual proyectada, presentando un Retorno sobre la Inversión (ROI) del 17,8 %, un periodo de recuperación (Payback) de 5,6 años, un Valor Presente Neto (VPN) de 6.751.114 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 17,45. Por el contrario, el Sistema de Biomasa solo alcanza a cubrir el -47.551.391 y una TIR que no aplica por ser negativa, debido a que sus costos operativos superan ampliamente los ahorros generados.

Se concluye que la energía solar es la solución óptima para fortalecer la autonomía energética y la competitividad de la finca, constituyéndose en un modelo técnico y financieramente replicable para otras fincas en el Huila.

### **Inglés**

This study comparatively evaluated the technical and economic feasibility of two small-scale self-generation systems (solar photovoltaic and biomass) to meet the energy demand of Villa Mercedes Farm in Palermo, Huila. The study began with a diagnostic assessment that identified a 171.5% increase in energy demand (from 88 to 239 kWh/month) due to the projected modernization of meat and dairy processing activities.

Through resource characterization, a solar potential of 5.45 peak sun hours (PSH) and an availability of 108 kg/day of cattle manure were determined. Based on these data, a 2.34 kWp photovoltaic system and a 12.06 m<sup>3</sup> biodigestion system with a 1 kW motor-generator were designed.

The results show that the grid-connected photovoltaic solar system can supply 100% of the projected annual energy demand, achieving a Return on Investment (ROI) of 17.8%, a Payback Period of 5.6 years, a Net Present Value (NPV) of 6,751,114, and an Internal Rate of Return (IRR) of 17.45%. In contrast, the biomass system only manages to cover part of the demand and presents a Net Present Value (NPV) of -47,551,391 and an IRR that is not applicable due to its negative value, as its operating costs significantly exceed the savings generated.

It is concluded that solar energy is the optimal solution for strengthening the farm's energy autonomy and competitiveness, constituting a technically and financially replicable model for other farms in the Huila region.

## **TABLA DE CONTENIDO**

<b>Capítulo 1 INTRODUCCION.....</b>	<b>10</b>
<b>Capítulo 2 OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
<b>Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>14</b>
<b>Capítulo 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>22</b>
<b>Capítulo 5 METODOLOGÍA .....</b>	<b>68</b>
<b>Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>72</b>
<b>Capítulo 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>140</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>142</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Variación presente y esperada en la utilización de biomasa durante 25 años .....	24
<b>Tabla 2</b>	Rendimientos de metano para diferentes mezclas de co-digestión.....	29
<b>Tabla 3</b>	Tiempo Composición típica del Biogás a partir de estiércol bovino .....	33
<b>Tabla 4</b>	Composición típica del Biol a partir de estiércol bovino.....	34
<b>Tabla 5</b>	Comparativa entre paneles monocristalinos y policristalinos.....	40
<b>Tabla 6</b>	Comparación técnico-operativa entre baterías de plomo-ácido e ion-litio para almacenamiento estacionario en la finca Villa Mercedes.....	44
<b>Tabla 7</b>	Cuadro de inventario de equipos electricos de la casa de la finca Villa mercedes .....	80
<b>Tabla 8</b>	Especificaciones técnicas cerca eléctrica.....	84
<b>Tabla 9</b>	Especificaciones equipo (130).....	85
<b>Tabla 10</b>	Especificaciones Báscula ganadera electrónica (131) .....	86
<b>Tabla 11</b>	Especificaciones técnicas Máquina de Ordeño carretilla (132).....	87
<b>Tabla 12</b>	Cuadro de Cargas actual de la casa de la finca Villa mercedes .....	89
<b>Tabla 13</b>	Cuadro de Cargas proyectadas adicionales de la finca Villa mercedes .....	90
<b>Tabla 14</b>	Cuadro de Cargas totales de la finca Villa mercedes .....	91
<b>Tabla 15</b>	GHI horario lugar paneles solares .....	93
<b>Tabla 16</b>	Estiércol promedio disponible en la finca Villa Mercedes .....	95
<b>Tabla 17</b>	Composición próxima del estiércol bovino .....	96
<b>Tabla 18</b>	Análisis elemental del estiércol bovino .....	97
<b>Tabla 19</b>	Tiempo de retención en función de la temperatura por región .....	98
<b>Tabla 20</b>	Características principales módulos fotovoltaicos.....	105
<b>Tabla 21</b>	Características principales Inversor.....	106
<b>Tabla 22</b>	Resultados PVsyst .....	112
<b>Tabla 23</b>	Comparación técnica de biodigestores aplicables a sistemas rurales .....	114
<b>Tabla 24</b>	Evaluación técnica según parámetros de diseño del sistema .....	115
<b>Tabla 25</b>	Cálculos realizados para el dimensionamiento del sistema de biodigestor .....	116
<b>Tabla 26</b>	Características técnicas del Motogenerador .....	120
<b>Tabla 27</b>	Estimación de CAPEX de equipos proyectados .....	123
<b>Tabla 28</b>	Estimación de OPEX de equipos proyectados.....	124
<b>Tabla 29</b>	Costos CAPEX Sistema Fotovoltaico .....	126
<b>Tabla 30</b>	Costos CAPEX Sistema de Biodigestión .....	129
<b>Tabla 31</b>	OPEX estimado del sistema de Biodigestión .....	130
<b>Tabla 32</b>	Producción, energía útil y fracción de demanda cubierta .....	132
<b>Tabla 33</b>	comparativo de CAPEX y OPEX entre sistemas.....	134

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Valor agregado por actividad económica – Participación (%) – Parte 1 (3) .....	15
<b>Figura 2</b> Valor agregado por actividad económica – Participación (%) – Parte 2 (3) .....	15
<b>Figura 3</b> Cantidad de predios por orientación del hato ganadero (12) .....	16
<b>Figura 4</b> Sacrificio de ganado por categorías según especies I trimestre (2024-2025) (14) .....	16
<b>Figura 5</b> Ubicación de potreros para siembra de maíz. ....	18
<b>Figura 6</b> Ordeño existente .....	19
<b>Figura 7</b> Esquema de procesos de conversión de residuos agrícolas en biogás. Adaptado de “Exploring agricultural waste biomass for energy, food and feed production and pollution mitigation: A review” (29).....	26
<b>Figura 8</b> Modelo de digester tubular: (a) esquema del sistema; (b) adaptación al Altiplano (techo tipo domo). Adaptado de “Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review” (24) .....	30
<b>Figura 9</b> Vía anaeróbica de degradación de la materia orgánica. Adaptado de “Recognizing the challenges of anaerobic digestion: Critical steps toward improving biogas generation”(33) .....	32
<b>Figura 10</b> Variación del pH y de la relación FOS/TAC durante la DA. Adaptado de “Pilot-Scale Anaerobic Digestion of Pig Manure with Thermal Pretreatment: Stability Monitoring to Improve the Potential for Obtaining Methane”(53).....	37
<b>Figura 11</b> Esquema sistema fotovoltaico off-grid. Adaptado de “Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review”(24) .....	48
<b>Figura 12</b> Esquema sistema fotovoltaico on-grid. Adaptado de “Harnessing solar energy for the Academic Area of the Police Aviation School through a photovoltaic system with grid connection” (87) .....	49
<b>Figura 13</b> Ejemplares bovinos de la finca .....	74
<b>Figura 14</b> Ubicación de potreros para siembra de maíz actual y proyectado .....	76
<b>Figura 15</b> Almacenamiento en el establo en bolsas de la cosecha de maíz recogida a mano.....	77
<b>Figura 16</b> Fotografía del letrero a la entrada de la finca Villa Mercedes .....	79
<b>Figura 17</b> Fotografía aérea de la casa habitacional y establo de la finca Villa Mercedes .....	79
<b>Figura 18</b> Estructura del techo de la casa .....	81
<b>Figura 19</b> Impulsor eléctrico .....	85
<b>Figura 20</b> Equipo pica pasto.....	86
<b>Figura 21</b> Báscula ganadera Electrónica (131) .....	87
<b>Figura 22</b> Equipo – Máquina de ordeño carretilla (132) .....	88
<b>Figura 23</b> Registro de consumo mensual de energía eléctrica (kWh).....	88
<b>Figura 24</b> GHI Finca Villa Mercedes. ....	92
<b>Figura 25</b> Trayectoria del sol Finca Villa Mercedes.....	94
<b>Figura 26</b> Estiércol fresco bovino .....	95
<b>Figura 27</b> Ubicación del techo de la casa finca Villa Mercedes .....	103
<b>Figura 28</b> Área del techo de la casa finca Villa Mercedes .....	104
<b>Figura 29</b> Esquema de instalación sistema conectado a la red.....	104
<b>Figura 30</b> Orientación del techo casa finca Villa Mercedes .....	105
<b>Figura 31</b> Inversor Bifasico marca GROWWATT .....	107
<b>Figura 32</b> Definición del arreglo fotovoltaico en PVsyst.....	108
<b>Figura 33</b> Figura 34 Definiciones Sombreado .....	111

<b>Figura 35</b> Construcción de la escena en PVsyst.....	112
<b>Figura 36</b> Área donde se colocaría el biodigestor .....	113
<b>Figura 37</b> Motogenerador 1kw (DF1500BG) (142).....	120

## Capítulo 1

### INTRODUCCION

La búsqueda de alternativas energéticas sostenibles y accesibles es un desafío que preocupa a nivel mundial, especialmente en zonas rurales donde la infraestructura eléctrica suele ser escasa o inexistente, y Colombia no es ajena a esta situación. De acuerdo con el mapa digital de cobertura rural de energía eléctrica elaborado por el DANE y el IGAC, en varios departamentos del país, incluido el Huila, persiste una fracción significativa de viviendas rurales sin servicio eléctrico formal (1) En las Zonas No Interconectadas (ZNI), que abarcan cerca del 52 % del territorio nacional y donde habitan más de 650.000 familias, el suministro eléctrico se apoya mayoritariamente en pequeños grupos electrógenos diésel, que representan alrededor del 92 % de la capacidad de generación instalada, mientras que las fuentes renovables apenas alcanzan el 8 % (2). En este contexto, explorar alternativas renovables como la energía solar fotovoltaica y la biomasa aparece como una oportunidad viable para avanzar hacia una matriz energética rural más limpia y resiliente.

El departamento del Huila, ubicado en el suroeste colombiano, cuenta con importantes recursos naturales ideales para generar energía renovable, especialmente solar y biomasa; este territorio, donde el 58 % de su actividad económica gira en torno a la agricultura, ganadería y pesca (3), enfrenta actualmente el reto de modernizar sus métodos de producción para ganar competitividad. Un ejemplo concreto es la finca Villa Mercedes, localizada en el municipio de Palermo, que carece de tecnologías adecuadas para optimizar su rendimiento, lo cual limita directamente su rentabilidad y sostenibilidad ambiental; la creciente demanda energética debido a la tecnificación en procesos productivos como carne y leche hace necesario buscar soluciones energéticas accesibles y ecológicas.

El propósito central de este estudio consiste en evaluar si es viable técnica y económicamente la implementación de un sistema de autogeneración energética, mediante energía solar fotovoltaica o la biomasa derivada de residuos ganaderos; la idea es identificar cuál alternativa podría satisfacer de mejor manera la demanda energética en la finca Villa Mercedes, teniendo en cuenta sus particularidades propias y el entorno rural en que está

localizada. La adopción de tecnologías como biodigestores y paneles solares no solamente favorecería la sostenibilidad energética, sino que ayudaría también a mejorar la eficiencia productiva y disminuir los costos operativos en el largo plazo (4), (5). La comparación técnica y económica entre estos dos sistemas permitirá determinar cuál resulta más adecuado para la finca, considerando aspectos como la disponibilidad local de recursos, costos asociados a la instalación y mantenimiento, y los beneficios financieros a largo plazo; igualmente, la investigación podría replicarse en otras fincas rurales del departamento del Huila donde aún hay rezagos importantes en mecanización y tecnificación.

Este estudio se justifica precisamente en la necesidad urgente de explorar opciones energéticas que apoyen la sostenibilidad en las actividades agropecuarias rurales; su relevancia se basa en proporcionar herramientas prácticas a productores rurales que buscan mejorar su posición competitiva y reducir la dependencia hacia fuentes externas de energía. De este modo, también invita a reflexionar sobre el futuro del sector agrícola en Colombia y destaca cómo la transición hacia energías renovables podría marcar un camino importante hacia el desarrollo económico y social en comunidades rurales, como se ha propuesto en otros trabajos para sistemas con biomasa (6), y fotovoltaicos (7); por lo tanto, anima al lector a descubrir las oportunidades que ofrecen estas tecnologías y su potencial contribución a la sostenibilidad rural.

Para lograr los objetivos planteados, la metodología del proyecto se organiza en tres etapas: i) un diagnóstico inicial y la caracterización de los recursos energéticos disponibles en la finca, ii) un análisis técnico con dimensionamiento de los sistemas de autogeneración fotovoltaico y de biomasa y iii) una evaluación económica comparativa entre ambas alternativas. Esta secuencia metodológica se fundamenta en esquemas de evaluación de sistemas de autogeneración con energías renovables aplicados en otros estudios desarrollados en contextos rurales colombianos (6).

Este trabajo pretende ir más allá de resolver el problema energético particular de la finca Villa Mercedes, ya que los resultados obtenidos pueden servir como referencia para el diseño de soluciones similares en otras fincas rurales con condiciones comparables, aportando elementos técnicos para la incorporación de energías renovables en el ámbito agropecuario colombiano.

## **Capítulo 2**

### **OBJETIVOS**

#### **2.1 Objetivo general**

Evaluar comparativamente dos sistemas de autogeneración a pequeña escala, basados en fuentes renovables (solar fotovoltaica y biomasa), con el fin de determinar su capacidad técnica y económica para satisfacer la demanda energética asociada a la tecnificación de la finca Villa Mercedes.

#### **2.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar la disponibilidad y el potencial de los recursos de energía solar y biomasa presentes en la finca Villa Mercedes.
- Dimensionar dos sistemas de autogeneración: uno con solar fotovoltaica y otro a partir de biomasa, con base en la demanda energética actual y proyectada de la finca Villa Mercedes.
- Evaluar comparativamente la viabilidad técnica y económica de los sistemas de autogeneración solar fotovoltaico y de biomasa.

## **Capítulo 3**

### **PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN**

#### **3.1 Contexto del sector y de la finca**

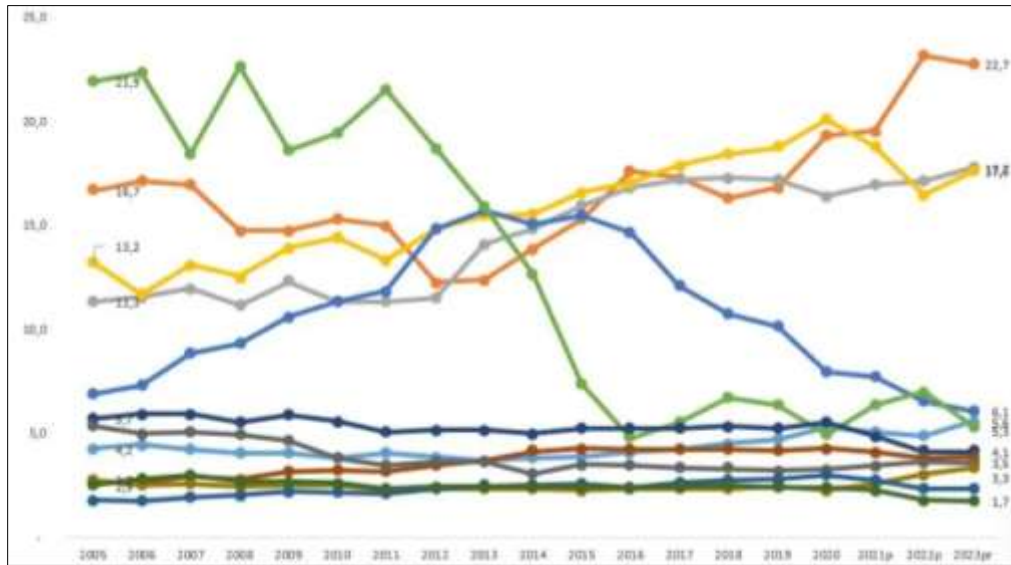
El departamento del Huila se encuentra ubicado al suroeste de Colombia en la región andina y es uno de los treinta y dos departamentos que conforman la república de Colombia. Su capital y ciudad más poblada es Neiva (8).

El departamento cuenta con 37 municipios y su economía genera el 1,71 % del PIB colombiano (9). De acuerdo con el DANE, posee una población estimada de 1.205.318 habitantes (8) correspondiente al 2,2 % de la participación en la población total del país (10).

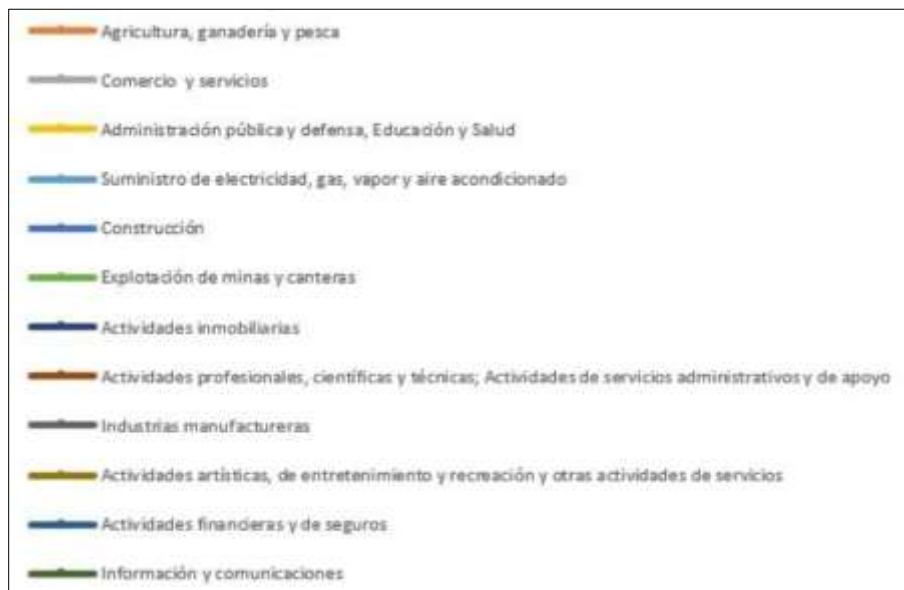
El departamento del Huila presenta una estructura económica diversificada. Entre las principales actividades económicas se encuentran la agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca; el comercio al por mayor y al por menor; la administración pública y defensa; la explotación de minas y canteras; la construcción; el suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado; las actividades inmobiliarias; las actividades profesionales, científicas y técnicas; las industrias manufactureras; las actividades artísticas, de entretenimiento y recreación; las actividades financieras y de seguros; así como los sectores de información y comunicaciones (11).

A pesar de tener una gran diversidad de actividades económicas, se observa que el 58 % del valor agregado de la economía en el Huila se centra en tres actividades principalmente: i) Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca; ii) Comercio y Servicio y iii) Administración pública, defensa y educación (3).

En la figura 1 y 2 se observa cómo la actividad económica de agricultura, ganadería y pesca ha venido incrementando participación (%) en el departamento del Huila hasta alcanzar el 22,7 % de valor agregado en el 2023p, es decir a precios corrientes un valor de 6.032 miles de millones de pesos (9).

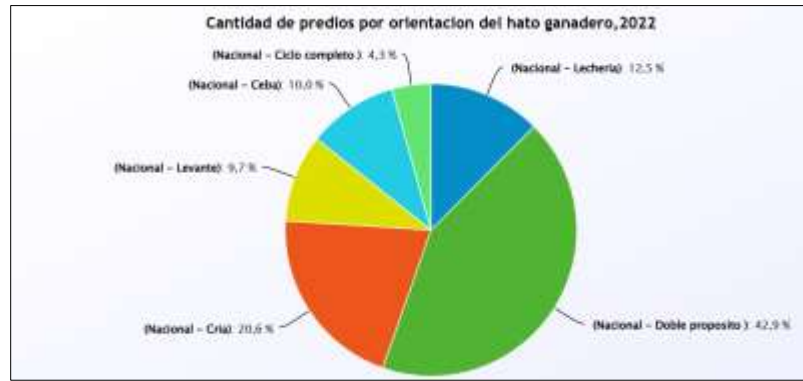


**Figura 1** Valor agregado por actividad económica – Participación (%) – Parte 1 (3)



**Figura 2** Valor agregado por actividad económica – Participación (%) – Parte 2 (3)

Según la Federación Nacional de Ganaderos el inventario de ganado bovino para el año 2024 alcanzó los 29.448.295 de cabezas, de las cuales el 42,9 % es de orientación doble propósito, es decir producción de carne y leche, a continuación, se observa en la figura 3 la cantidad de predios que hay en Colombia por orientación del hato ganadero (12).



**Figura 3** Cantidad de predios por orientación del hato ganadero (12)

La ganadería es una actividad productiva importante para la economía del Huila, el alto nivel de sacrificio bovino refleja el aumento en el consumo local y de exportación. Para el primer trimestre de 2025, el sacrificio total de cabezas de ganado vacuno en Colombia alcanzó las 834.843 unidades, frente a las 745.615 del I trimestre del 2024, lo que representa un incremento del 12 % (13). Para el componente de exportación, también se presentó un incremento de 312 % al pasar de 9.804 cabezas sacrificadas en el primer trimestre de 2024 a 40.457 cabezas en el mismo trimestre de 2025 (14). En la figura 4 se observa el Sacrificio de ganado por categorías según especies I trimestre (2024-2025) en el Huila.

Especie	Total cabezas <sup>1</sup>	I trim 2024				Exportación <sup>2</sup>	Total cabezas	I trim 2025			
		Consumo interno			Exportación <sup>2</sup>			Consumo interno			Exportación <sup>2</sup>
		Machos	Hembras	Terneros				Machos	Hembras	Terneros	
Vacunos	745.615	417.626	312.666	5.519	9.804	834.843	459.765	329.639	4.982	40.457	
Bufalinos	9.994	7.569	2.425	0	0	15.293	11.462	3.831	0	0	
Porcinos	1.429.442	881.634	547.808	N.A.	0	1.483.700	991.978	491.722	N.A.	0	
Caprinos	5.947	3.294	2.653	N.A.	0	8.716	5.071	3.645	N.A.	0	
Ovinos*	8.480	5.172	3.308	N.A.	0	9.084	5.502	3.582	N.A.	0	

**Figura 4** Sacrificio de ganado por categorías según especies I trimestre (2024-2025) (14)

Para las fincas de doble propósito, la venta de carne y leche es una parte significativa de los ingresos, ya que con estos recursos se paga el mayordomo, los medicamentos requeridos por los animales y se cubre el mantenimiento de los equipos menores de la finca. Es por ello por lo que se hace necesario optimizar la producción y la calidad de la leche y de la carne, con lo

cual se busca incrementar la rentabilidad y sostenibilidad de estos sistemas de producción (15).

Según estudios basados en datos del proyecto Ganadería Colombiana Sostenible y LivestockPlus, se identifican cuatro categorías de ganaderías de doble propósito:

- Muy pequeñas: 1 – 30 bovinos
- Pequeñas: 31 – 50 bovinos
- Medianas: 51 – 250 bovinos
- Grandes: más de 251 bovinos

Estos rangos provienen de una tipificación técnica y ambiental desarrollada en más de 1.300 fincas de doble propósito en diversas regiones colombianas (16).

Debido a lo anterior la finca Villa Mercedes cuenta con 30 cabezas de ganado por lo cual es catalogada como una finca de doble propósito muy pequeña, sin embargo, tiene el potencial para convertirse en una de mediana, como se describe a continuación.

La finca se encuentra ubicada en el municipio de Palermo, departamento del Huila. Cuenta con una extensión total de 43 hectáreas, de las cuales solamente 3,64 hectáreas son mecanizables y aptas para procesos agropecuarios.

Las 3,64 hectáreas mencionadas anteriormente están distribuidas en 3 potreros. Los potreros 1 y 3, con una extensión entre los dos de 2,75 hectáreas, se encuentran disponibles para la siembra y es utilizado actualmente para pastoreo. Por otra parte, el potrero No 2 con 0,89 hectáreas se encuentra destinado actualmente a la siembra de alimento para el ganado vacuno. En la figura 5 se observa la ubicación de los potreros disponibles para la siembra de maíz, tanto para el ganado vacuno actual como para el proyectado.



**Figura 5** Ubicación de potreros para siembra de maíz.

*Elaboración Propia*

Actualmente, el potrero No 2 tiene un ciclo productivo continuo durante todo el año. Una vez sembrado el maíz, este alcanza la etapa de cosecha a los 3 meses. En esta etapa el cultivo se corta con azadón y se pica con una pica pasto a gasolina para posteriormente ensilarlo a mano en bolsas de plástico. Una vez terminada la recolección del cultivo, se inicia la preparación del terreno para el siguiente cultivo.

El establecimiento de pastos de corte como el silo de maíz trae ventajas importantes en el desarrollo de una ganadería de doble propósito sostenible, ya que parte este puede ser entregado de forma fresca a los animales y el restante es almacenado para utilizarlo en épocas de menor producción o críticas (temporadas de baja precipitación o durante veranos prolongados), dado que puede ser almacenado por largos periodos de tiempo sin que pierda la calidad (15).

### **3.2 Formulación del problema**

La problemática central radica en que la finca Villa Mercedes presenta limitaciones para tecnificar los procesos asociados a la producción de carne y leche.

Actualmente, las actividades de corte y ensilaje del maíz, pesaje de ganado para la venta, electrificación de cercas para el pastoreo sostenible y ordeño mecánico se hacen de forma

manual o no existen como es el caso de las cercas y la báscula. Lo anterior afecta la eficiencia y productividad de la finca y limita su crecimiento.

En particular, la finca Villa Mercedes no cuenta con una báscula ganadera para el seguimiento de la ganancia del peso de las crías. La venta de las vacas se hace “al ojo”, pudiendo generar pérdidas por la subjetividad que esta estrategia conlleva. La única forma de saber el valor real comercial de cada vaca es pesándolas en una báscula, con lo que el precio de venta se determinaría de una forma más exacta (17). Como lo describe Contexto Ganadero, contar con una báscula ganadera también permitiría tener un histórico de peso desde que nace la vaca y durante su crecimiento, indispensable para establecer los planes de alimentación o si se están perdiendo peso por enfermedades (17).

Actualmente, los potreros 1 y 2 no cuentan con cercas eléctricas para protegerlos de los propios animales (vacas) o de animales silvestres que pudieran invadir y afectar la cosecha futura. Por tal razón se requiere instalar aproximadamente 991,2 metros de cerca eléctrica para proteger la inversión destinada al cultivo.

El proceso de ordeño se realiza en el establo de la finca, en la figura 6 se observa el ordeño convencional construido en madera y en piso en cemento. En este lugar se ordeñan manualmente 15 reses por día, algunas de ellas acompañadas de su cría. Esta actividad la realiza el mayordomo y sus hijos de forma manual. Es un proceso que requiere interacción directa entre el ordeñador y el animal y se realiza vaca a vaca.



*Figura 6 Ordeño existente*

El ordeño manual en la finca Villa Mercedes requiere gran cantidad de mano de obra, consume mucho tiempo y la mano de obra es dedicada, esto puede convertirse en una barrera para mejorar la productividad de la finca si el número de vacas a ordeñar aumenta. También el ordeño manual puede afectar la producción de leche debido a la variación de la técnica del ordeñador y errores humanos. Un ordeño mecánico ayuda a reducir los niveles de estrés de las vacas ya que reduce la ansiedad y el malestar y mejora la producción de leche (18).

Con el objetivo de mejorar la productividad de la finca y aprovechar las 2,75 hectáreas disponibles para la siembra con maíz (Ver figura 5: Potrero 1 y 3). Se proyecta implementar un proceso de tecnificación que permita incrementar gradualmente el número de cabezas de ganado y, en consecuencia, aumentar la producción de carne y leche. Sin embargo, con la inclusión de los nuevos equipos para los diferentes procesos, la demanda energética pasará de 88,038 a 239,007 kWh/mes, lo que representa un aumento del 171,5 % de la misma, tal como se presenta en el Capítulo 6 en la Tabla 12 Cuadro de Cargas actual de la casa de la finca Villa Mercedes.

### **3.3 Justificación social y sectorial**

Según el 3er Censo Nacional Agropecuario del DANE en Colombia, solo el 16,4 % de las UPA (Unidades Productivas Agropecuarias) en zona rural dispersa declararon tener maquinaria para actividades agropecuarias, mientras el 83,3 % no la tenía, evidenciando un bajo nivel de mecanización (19).

La mecanización es mayor en UPA grandes (>1.000 ha, con un 49,7 %), y muy limitada en pequeñas UPA (<5 ha, con solo un 11,6 %) (19).

Si bien el estudio tiene como eje la finca Villa Mercedes, sus resultados poseen un alto potencial de replicabilidad en otras fincas. En el departamento del Huila, el subsector agrícola que cuenta con maquinaria es del 48,4 %, mientras que el pecuario cuenta con 35,1 % (20). Por lo que este análisis puede constituirse en una referencia valiosa para otros productores interesados en aumentar su infraestructura productiva y de comercialización, además de optimizar su rentabilidad mediante la autogeneración energética.

### **3.4 Justificación técnica**

Desde el punto de vista técnico, esta investigación permite evaluar la capacidad de los dos sistemas de autogeneración propuestos, basados en fuentes renovables como la energía solar y biomasa, para abastecer la demanda instalada y proyectada para la tecnificación de la finca Villa Mercedes. Para ello se realiza la caracterización de los recursos que hay disponibles, el análisis de la demanda con base en el balance de cargas y el dimensionamiento de los sistemas.

Así mismo, la comparación de ambos sistemas nos permite evaluar sus ventajas y/o desventajas, en términos de disponibilidad de recursos, infraestructura disponible, operación y mantenimiento.

### **3.5 Justificación ambiental**

Desde el punto de vista ambiental, esta investigación promueve el uso de fuentes de energías renovables, especialmente el uso de biomasa con el aprovechamiento del estiércol bovino y la energía solar fotovoltaica, frente al uso de combustibles convencionales.

En el caso de la biomasa, el manejo y disposición adecuada de este residuo permite reducir las emisiones de metano, gas que es liberado naturalmente por la descomposición del estiércol en el campo.

## **Capítulo 4**

### **MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE**

Este capítulo aborda el marco teórico y el estado del arte en torno a la autogeneración de energía a pequeña escala mediante fuentes renovables, particularmente la biomasa y la energía solar fotovoltaica. Se examinan los principios esenciales que rigen los sistemas de autogeneración energética, los cuales ofrecen la posibilidad de disminuir la dependencia de las redes eléctricas tradicionales. La revisión incluye también los principales desafíos reportados en la literatura, relacionados con los costos de inversión, operación y mantenimiento, así como con ciertas limitaciones tecnológicas y de infraestructura para su implementación en contextos rurales. Asimismo, se analizan diversos estudios tanto a nivel nacional como internacional que han explorado el uso de biomasa y energía solar fotovoltaica para la generación de energía en zonas rurales, reportando su potencial para la modernización de fincas agrícolas. A partir de esta revisión, se señalan vacíos identificados en la literatura y líneas de investigación futuras vinculadas con la adopción de estos sistemas en fincas ganaderas de pequeña escala, las cuales orientan el enfoque del presente estudio.

#### **4.1 Marco teórico**

##### **4.1.1 Generalidades sobre Sistemas de Autogeneración Energética Rural**

La autogeneración a pequeña escala comprende sistemas locales y descentralizados que les permiten a los usuarios producir electricidad por cuenta propia mediante fuentes renovables, entre ellas la energía solar y la biomasa; este tipo de enfoque aparece como una alternativa oportuna para avanzar hacia sistemas energéticos sostenibles, sobre todo en áreas rurales, donde las redes eléctricas suelen ser precarias o simplemente no existen (21). Este tipo de instalaciones ofrece la posibilidad real de disminuir la dependencia frente a las redes tradicionales de energía y favorece una distribución descentralizada; en consecuencia, fortalece la capacidad de respuesta frente a posibles interrupciones o fallas en el suministro eléctrico nacional (22).

Al revisar las ventajas que brindan las fuentes renovables, específicamente la solar fotovoltaica y la biomasa, se observan beneficios ambientales y económicos; estas fuentes pueden aprovechar recursos locales y contribuyen a disminuir emisiones asociadas al cambio climático. En zonas rurales, la energía solar permite utilizar la radiación disponible cada día (21), mientras que la biomasa, obtenida a partir de restos agrícolas o estiércol animal, constituye una alternativa práctica para generar energía a nivel local (23). En conjunto, ambas fuentes ofrecen alternativas adaptadas a cada localidad, según sus recursos y necesidades específicas.

La implementación de estos sistemas no es sencilla, ya que presenta diversas dificultades, especialmente en áreas rurales con condiciones particulares. Entre los obstáculos más comunes se incluyen los tecnológicos, económicos y logísticos (22). En muchas comunidades, la falta de infraestructura necesaria para la instalación de estos equipos dificulta la adopción de tecnologías renovables, así como los costos de las tecnologías suelen superar la capacidad económica de las comunidades, lo que complica la obtención de los recursos financieros necesarios para la instalación (24). De la misma manera, la variabilidad en la producción de energía solar, influenciada por las horas de luz diarias, requiere la incorporación de soluciones adicionales, como los sistemas de almacenamiento, lo que incrementa el costo final de estos sistemas (25).

## **4.1.2 Sistemas basados en Biomasa**

### **4.1.2.1 Biomasa como Fuente de Energía Renovable**

La biomasa es un tipo de energía renovable que proviene del aprovechamiento del material orgánico; este material puede incluir residuos de cultivos, restos de poda de árboles, estiércol o desperdicios alimenticios, entre otros. La diversidad de estos residuos permite múltiples aplicaciones para generar energía; especialmente en el sector agrícola y rural, la biomasa representa una opción bastante accesible y amigable con el medio ambiente para responder a las necesidades energéticas actuales. Aprovechar residuos agrícolas para obtener energía resulta económico y mejora tanto la producción agrícola como el rendimiento energético;

esta característica convierte a la biomasa en un recurso útil y apropiado para muchas comunidades rurales (23).

La biomasa como fuente energética tiene varias ventajas que van más allá de la simple generación de electricidad; al utilizar los residuos locales disponibles, permite reducir la dependencia hacia los combustibles fósiles tradicionales y disminuir así las emisiones contaminantes generadas en estos procesos. Como lo muestra Saleem (26), el uso de la biomasa se concentra principalmente en aplicaciones térmicas (calor) que tradicionalmente se realiza mediante la combustión de leña y, en menor proporción, en la generación de electricidad y la producción de biocombustibles a través de procesos de digestión; estas aplicaciones son especialmente interesantes para la agroindustria y otros sectores productivos rurales, facilitando la modernización y tecnificación de distintos procesos.

**Tabla 1** Variación presente y esperada en la utilización de biomasa durante 25 años

Opciones para el aprovechamiento de la biomasa	2006	2010	2020	2030
Electricidad	3,8	6,3	14,9	16,1
Calor	94,0	83,3	71,4	72,3
Biocombustibles	2,2	10,4	15,7	11,6

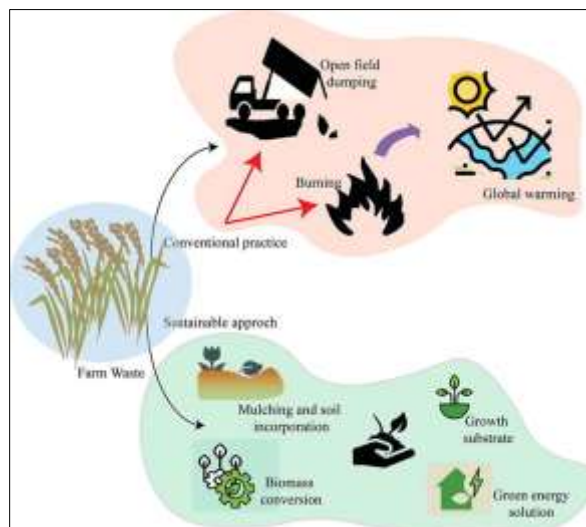
Nota: Todos los valores están en porcentaje del total 100 %. Adaptado de “Possibility of utilizing agriculture biomass as a renewable and sustainable future energy source” (26)

#### 4.1.2.2 Biomasa para Producción de Energía: Tecnologías y Métodos

Existen distintos métodos para utilizar la biomasa en la generación de energía; entre ellos aparecen la combustión, gasificación, pirólisis y biodigestión, cada uno con características propias según el tipo de material orgánico disponible o los requerimientos energéticos específicos de cada región. Por ejemplo, la combustión directa es un método sencillo y ampliamente usado para producir calor o electricidad; entretanto, mediante la gasificación y pirólisis se puede transformar la biomasa en gases combustibles o productos sólidos conocidos como biochar (27).

Dentro de estas opciones sobresale la biodigestión, un proceso en el que microorganismos actúan sobre materia orgánica en condiciones sin presencia de oxígeno para producir biogás. Este procedimiento convierte materiales como estiércol o residuos agrícolas en metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), generando al mismo tiempo un material residual llamado digestato que funciona como fertilizante natural, lo cual ayuda a establecer ciclos sostenibles dentro del sector agrícola, como menciona Aravani et al. (28); asimismo, el biogás producido puede utilizarse para generación eléctrica, calefacción o incluso como combustible vehicular, mejorando la autonomía energética especialmente en regiones rurales y disminuyendo la dependencia de recursos externos.

El biogás derivado de la biodigestión se presenta como una opción alternativa a los combustibles fósiles y fuentes energéticas tradicionales no renovables; esto es particularmente cierto en contextos rurales donde el acceso a redes eléctricas convencionales suele ser limitado o inexistente (28), Babu et al. (29) también destacan que implementar sistemas basados en biodigestión permite alcanzar autosuficiencia energética y contribuye a reducir las consecuencias ambientales derivadas del manejo inapropiado de residuos orgánicos; la Figura 7 ilustra gráficamente cómo la biomasa agrícola puede aprovecharse en la producción de biogás.



*Figura 7 Esquema de procesos de conversión de residuos agrícolas en biogás. Adaptado de “Exploring agricultural waste biomass for energy, food and feed production and pollution mitigation: A review” (29)*

#### **4.1.2.3 Biomasa en Zonas Rurales y Tecnificación Agrícola**

La biomasa presenta amplias posibilidades para apoyar la autosuficiencia energética en fincas rurales pequeñas y medianas; especialmente en lugares donde el acceso a la electricidad convencional resulta escaso o limitado, emplear biomasa puede representar una alternativa viable para satisfacer las necesidades energéticas locales. Según Rodríguez et al. (30), los residuos agrícolas específicos, tales como estiércol, restos de cultivos y desechos provenientes de actividades forestales, abundan en estas regiones rurales y, al transformarse en energía, favorecen la reducción de gastos operativos y fortalecen la infraestructura energética de la zona.

En este sentido, la finca Villa Mercedes podría aprovechar particularmente sistemas de biodigestión que reutilicen residuos agrícolas y estiércol animal para generar biogás; este biogás cubriría necesidades energéticas internas y permitiría, a su vez, utilizar el digestato como fertilizante orgánico que mejora la productividad agrícola con una perspectiva sostenible, Aravani et al. (28) mencionan precisamente que este método transforma desechos

en recursos útiles, disminuye costos operativos, e impulsa la adopción de tecnologías avanzadas y sostenibles en la actividad agrícola.

Asimismo, utilizar biomasa en áreas rurales impulsa la tecnificación del sector agrícola, ya que facilita el acceso a fuentes renovables de energía y permite implementar tecnologías novedosas. Según Saleem (26), la biomasa ofrece beneficios energéticos claros y contribuye al desarrollo económico en comunidades rurales, pues fortalece su capacidad productiva y disminuye la dependencia hacia recursos externos; por lo que representa una oportunidad para generar energía renovable, así como promover la innovación tecnológica y el crecimiento del sector agrícola local.

#### **4.1.2.4 El Proceso de Biodigestión**

En el tratamiento biológico de residuos orgánicos existen dos rutas principales, la digestión aeróbica y anaeróbica. La primera ocurre en presencia de oxígeno y se emplea sobre todo para la estabilización/compostaje, generando CO<sub>2</sub>, agua y biomasa microbiana, por lo que no produce biogás aprovechable (29). En cambio, la digestión anaeróbica, al operar sin oxígeno permite valorizar sustratos locales como el estiércol bovino en forma de biogás utilizable para fines energéticos; por este motivo es la opción seleccionada en esta investigación, con el fin de abastecer la demanda eléctrica de Villa Mercedes. Cabe recalcar que esta tecnología de referencia ha sido ampliamente aplicada en contextos rurales latinoamericanos (24).

La biodigestión anaeróbica es un proceso biológico que sucede en ambientes sin oxígeno; en él, diversos microorganismos trabajan juntos para descomponer materia orgánica, produciendo principalmente biogás. Todo esto ocurre dentro de estructuras conocidas como digestores anaeróbicos, en las que grupos específicos de bacterias, de tipo acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas, cumplen funciones particulares al transformar residuos agrícolas, estiércol o desechos alimenticios en biogás; este gas está compuesto básicamente por metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Según Meneses et al. (31), el éxito del proceso

depende considerablemente de la interacción apropiada entre los microorganismos y factores operacionales concretos como temperatura o pH.

El proceso de biodigestión resulta atractivo no únicamente porque facilita la producción de energía renovable, sino también porque colabora directamente con la protección del medio ambiente; al transformar residuos orgánicos evita la liberación espontánea y dañina de gases contaminantes como el metano, que normalmente ocurriría en vertederos o mediante la descomposición natural al aire libre (32). Por esta razón, se considera una herramienta útil para disminuir la huella de carbono generada por actividades humanas; Rasapoor et al. (33) mencionan que, junto al biogás, se generan otros productos del proceso como el fertilizante que se compone por digestato (fracción sólida) y biol (fracción líquida), materiales con contenido de N, P y K que posteriormente sirven como acondicionadores del suelo, completando el cierre de ciclos de nutrientes.

#### **4.1.2.5 Factores que afectan la biodigestión**

El rendimiento de la biodigestión está condicionado por múltiples factores; uno de los que más influye es la composición específica del sustrato utilizado (34), esto se debe a que no todos los residuos agrícolas tienen las mismas características químicas. Por ejemplo, materiales como el estiércol o los restos vegetales poseen composiciones diversas que determinan cómo se descomponen en el digestor; una variable especialmente importante en este sentido es la proporción entre carbono y nitrógeno (C/N), donde el sandoval et al., (34), recomienda que sea entre 20:1 y 30:1 como rango óptimo. Esta relación resulta decisiva porque tiene una fuerte incidencia en la actividad de los microorganismos encargados de producir el biogás, así como en el volumen final obtenido de metano; en este sentido, Zheng et al. (35) plantean que mantener una proporción equilibrada de C/N evita que aparezcan sustancias tóxicas dentro del digestor, las cuales podrían afectar negativamente la capacidad para producir metano.

Un desequilibrio en esta relación bien sea por exceso de carbono o nitrógeno, genera complicaciones en la estabilidad general del proceso de biodigestión. Cuando la proporción C/N es demasiado baja aparece el riesgo de formación excesiva de amoníaco, lo cual resulta perjudicial para la población microbiana encargada de generar metano (35). Por otra parte, cuando esta proporción se eleva en exceso ocurre una disminución en la actividad bacteriana general, situación que afecta la eficiencia y productividad del proceso completo. En línea con esto, González et al. (36) proponen que la combinación equilibrada de varios tipos de residuos agrícolas mediante co-digestión favorece la regulación de la relación C/N, mejora la estabilidad biológica dentro del digestor y optimiza la cantidad total de biogás generado (Tabla 2).

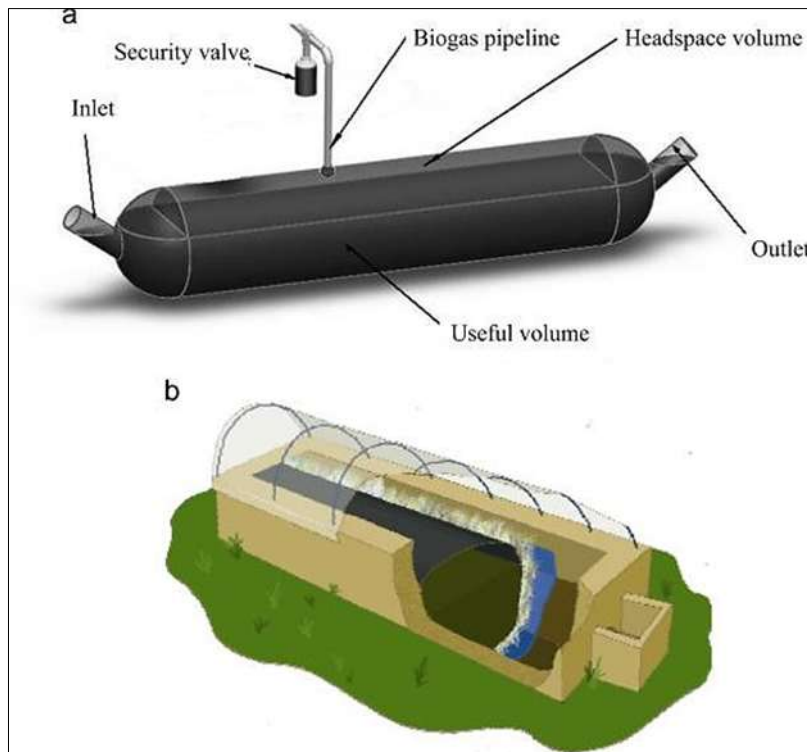
**Tabla 2** Rendimientos de metano para diferentes mezclas de co-digestión.

<b>Mezcla de digestión</b>	<b>Rendimiento de metano (L CH<sub>4</sub> /g VS)</b>
Lodos de depuradora + residuos alimentarios	0,293–0,365
Lodos activados residuales + fracción orgánica de residuos sólidos urbanos	0,162–0,243
Lodos de depuradora + lodos de cervecería	0,176–0,263
Lodos de depuradora + lixiviados de residuos alimentarios	0,233–0,344
Lodos de depuradora + paja de maíz	0,336–0,472
Lodos de depuradora + estiércol de ganado	0,352–0,470
Estiércol de cerdo + glicerina	0,349–0,467
Estiércol de cerdo + ESBP 1	0,212

Nota: ESBP: pulpa de remolacha azucarera agotada en proporción de mezcla 25:75. Adaptado de “Anaerobic Co-Digestion of Wastes: Reviewing Current Status and Approaches for Enhancing Biogas Production” (36)

#### **4.1.2.6 Tipos de Biodigestores y su Aplicación en el Contexto Rural**

Existen diversas clases de biodigestores ajustados según las particularidades de cada región y el tipo específico de residuos disponibles; en este sentido, algunos biodigestores funcionan mejor en contextos donde hay un volumen grande de material orgánico disponible, como ocurre con los sistemas de flujo continuo, donde la alimentación permanente de residuos facilita una producción estable y constante de biogás (37). Por otro lado, cuando los aportes de material orgánico son irregulares, como sucede frecuentemente en zonas rurales, resultan más convenientes los biodigestores de carga intermitente; estos se adaptan fácilmente a pequeñas cantidades de residuos, aportados de forma menos frecuente (37). Según Cremonez et al. (38), escoger entre un tipo u otro depende bastante de la cantidad de sustrato disponible y de la estabilidad con que este se recibe; también influyen las condiciones particulares en las que operará el biodigestor.



**Figura 8** Modelo de digester tubular: (a) esquema del sistema; (b) adaptación al Altiplano (techo tipo domo). Adaptado de “Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review” (24)

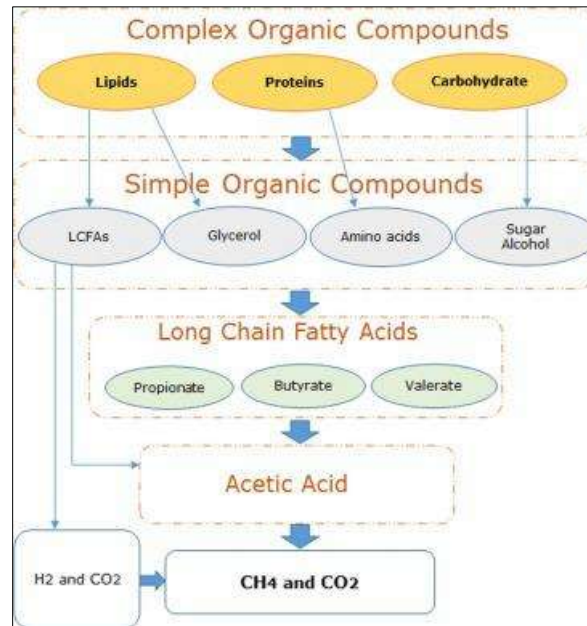
En áreas rurales de América Latina suelen preferirse los biodigestores económicos, como los modelos tubulares o aquellos hechos con geomembrana (Figura 8); estos se destacan por ser sencillos de construir y operar con recursos mínimos. Dichos sistemas encajan especialmente bien en fincas pequeñas y medianas, pues generan suficiente biogás para atender las necesidades energéticas de las familias, logrando rendimientos entre 6 y 7 kWh por metro cúbico generado (39). Según mencionan Triviño et al. (40), estos biodigestores tienen la ventaja adicional de poder construirse utilizando materiales locales; así, el costo de instalación disminuye considerablemente. Su facilidad para adaptarse al entorno rural, caracterizado muchas veces por recursos económicos y técnicos limitados, convierte a estos sistemas en una alternativa práctica para alcanzar la autosuficiencia energética dentro de las comunidades.

#### **4.1.2.7 Etapas del Proceso de Digestión Anaeróbica**

El proceso de digestión anaeróbica consta de cuatro etapas secuenciales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En la hidrólisis, las macromoléculas presentes en el sustrato, como los carbohidratos, proteínas y lípidos, se descomponen en compuestos más simples, como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos, facilitando su asimilación por los microorganismos (34). Durante la acidogénesis, los productos de la hidrólisis se fermentan para producir ácidos grasos volátiles, hidrógeno, dióxido de carbono y otros compuestos (Figura 7) (41). Según Cai et al. (42), esta etapa es crucial, ya que prepara el sustrato para las fases siguientes, en las cuales se forma el biogás.

En la acetogénesis, los productos generados en la acidogénesis se convierten principalmente en ácido acético y otros productos intermedios, como hidrógeno y dióxido de carbono. Finalmente, en la metanogénesis, los microorganismos metanogénicos convierten el ácido acético y el hidrógeno en metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que constituyen los principales componentes del biogás (Figura 9), Rasapoor et al. (33) explican que las condiciones ambientales, como la temperatura y el pH, juegan un papel fundamental en cada

una de estas etapas, ya que afectan la actividad de los microorganismos responsables de la descomposición de la materia orgánica.



**Figura 9** Vía anaeróbica de degradación de la materia orgánica. Adaptado de “Recognizing the challenges of anaerobic digestion: Critical steps toward improving biogas generation”(33)

#### 4.1.2.8 Propiedades y usos del biogás

El biogás producido mediante biodigestión es una mezcla de varios gases, siendo los principales el metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), y trazas de otros gases como nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y vapor de agua. En el caso del biogás generado a partir de estiércol bovino, se han reportado composiciones típicas de 52–62 % de  $\text{CH}_4$  y 31–39 % de  $\text{CO}_2$ , con concentraciones de  $\text{H}_2\text{S}$  del orden de  $65,5 \pm 7,8$  ppm, además de compuestos orgánicos no metánicos en trazas (43), (44). El metano, con su alto poder calorífico, convierte al biogás en una fuente de energía renovable útil para diversos fines, como la generación de electricidad, calefacción y cocción; a escala mundial, se estima que casi dos tercios (~67 %) de la producción de biogás se destinan a la generación de electricidad y calor (incluida la cogeneración), mientras que alrededor de un 30 % se utiliza directamente

en edificaciones para calefacción y cocina y la fracción restante se purifica a biometano para su inyección en redes de gas o uso como combustible vehicular, según la Agencia Internacional de Energía (IEA) (45). Del mismo modo, Jameel et al. (46) afirman que, además de estos usos, el biogás puede ser purificado y utilizado como combustible para vehículos, contribuyendo a la transición hacia una economía baja en carbono.

### Composición próxima del Biogás y el Biol

El principal producto gaseoso de la digestión anaerobia del estiércol bovino es el biogás. Su composición puede variar en función de las condiciones operativas del biodigestor, la relación de dilución del sustrato y el manejo del estiércol. De acuerdo con la literatura, los componentes mayoritarios del biogás proveniente de estiércol bovino son metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), además de concentraciones menores de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y trazas de compuestos orgánicos no metánicos (NMOCs). Para evitar ambigüedades, en esta sección los porcentajes de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> se reportan en base seca (sin incluir el vapor de agua), mientras que la humedad se presenta por separado como fracción volumétrica, dado que el biogás crudo suele salir del digestor con contenido apreciable de H<sub>2</sub>O. La Tabla 3 muestra los valores reportados para la composición del biogás proveniente de estiércol bovino.

*Tabla 3 Composición típica del Biogás a partir de estiércol bovino*

Parámetro	Valor / Rango Reportado	Fuente
Metano (CH <sub>4</sub> )	52 % – 62,07 %	(44), (47), (48)
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	31 % – 39 %	(43), (47), (48)
H <sub>2</sub> S (Ácido sulfhídrico)	65,5 ± 7,78 ppm	(44)
Compuestos Orgánicos No-Metánicos (NMOCs)	Trazas de H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , alcoholes, ácidos volátiles, etc.	(43), (48)
Contenido de Humedad	3,1–7,3 % v/v (25–40 °C, 1 atm)	(43)
Poder Calorífico Inferior (PCI)	3,466 Mcal/m <sup>3</sup> ≈ 14,5 MJ/m <sup>3</sup> ≈ 4 kWh/m <sup>3</sup>	(48)

Nota: Adaptado de estudios previos.

El biol, subproducto líquido de la digestión anaeróbica, es otro efluente importante que varía según las condiciones operacionales del biodigestor. Este líquido, rico en nutrientes, se puede utilizar como fertilizante en pasturas o cultivos. Según los estudios previos sobre biol generado a partir de estiércol bovino, los parámetros típicos del biol se presentan en la Tabla 4, los cuales incluyen nitrógeno, fósforo, potasio, y otros micronutrientes importantes para la agricultura sostenible.

**Tabla 4** Composición típica del Biol a partir de estiércol bovino

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
pH	6,90	-
Conductividad eléctrica	16,32	mS·cm <sup>-1</sup>
Nitrógeno (N)	290,0	mg·L <sup>-1</sup>
Fósforo (P)	17,78	mg·L <sup>-1</sup>
Potasio (K)	111,7	mg·L <sup>-1</sup>
Magnesio (Mg)	153,2	mg·L <sup>-1</sup>
Hierro (Fe)	1,530	mg·L <sup>-1</sup>
Zinc (Zn)	0,140	mg·L <sup>-1</sup>

Nota: Adaptado de (49)

Estos subproductos mejoran la eficiencia del sistema agrícola, promoviendo un enfoque sostenible y ecológico, alineado con las mejores prácticas de manejo de recursos y la autosuficiencia energética en zonas rurales (43), (50).

El impacto ambiental del biogás es considerable, ya que su producción y utilización permiten la captura de metano, un gas de efecto invernadero mucho más potente que el CO<sub>2</sub>. (32). Al capturarlo y aprovecharlo energéticamente (o, en su defecto, quemarlo de forma controlada),

el CH<sub>4</sub> se transforma en CO<sub>2</sub>, cuyo potencial de calentamiento global es ~25 veces menor; con ello se evitan las emisiones fugitivas asociadas al almacenamiento y a la descomposición no controlada de estiércoles y residuos orgánicos, contribuyendo de manera directa a la mitigación climática (32). En contextos rurales, la implementación de biodigestores dimensionados a partir de los flujos reales de excretas, como en diseños para unidades pecuarias, ordena el manejo de residuos y viabiliza el uso del biogás en sitio, reforzando el beneficio ambiental de la captura de CH<sub>4</sub> (51).

#### **4.1.2.9 Evaluación técnica, monitoreo y control de los sistemas de autogeneración con biomasa**

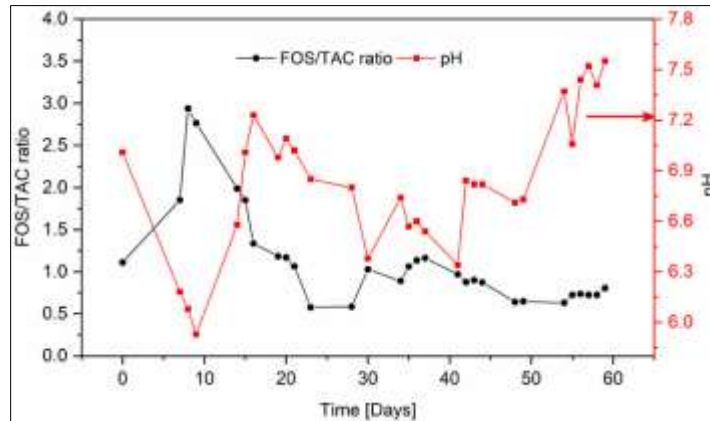
El dimensionamiento adecuado de un biodigestor a pequeña escala requiere de un cálculo preciso de la capacidad de procesamiento del sustrato, tomando en cuenta el tipo de residuos disponibles y la demanda energética de la finca. En zonas rurales, especialmente en las que se utilizan residuos agrícolas y estiércol como materia prima, es crucial calcular la cantidad de biogás que se puede generar a partir de los residuos orgánicos producidos diariamente. Issahaku et al. (37) reportan producciones típicas de entre 0,20 y 0,40 m<sup>3</sup> de biogás por kilogramo de estiércol tratado. Considerando que el biogás obtenido a partir de estiércol bovino contiene alrededor de 52–62 % de CH<sub>4</sub> y presenta un poder calorífico inferior cercano a 4 kWh/m<sup>3</sup> (43), este rango de producción equivale aproximadamente a 0,8–1,6 kWh de energía por kg de estiércol. Estos valores de referencia permiten dimensionar biodigestores rurales y comparar el potencial energético de la biomasa disponible con la demanda eléctrica y térmica de la finca.

La eficiencia en la producción de biogás depende de factores como la calidad y la cantidad del sustrato. La optimización del proceso de biodigestión se puede lograr ajustando el tiempo de retención del sustrato, la temperatura y el pH dentro del biodigestor. Para aportar criterios operativos concretos, en climas tropicales el tiempo de retención de sustrato recomendado se sitúa alrededor de 20 días, incrementándose a 30 y 60 días en regiones más frías (valle y altiplano, respectivamente) (52). En paralelo, el seguimiento del pH cercano a la neutralidad

y de la relación FOS/TAC como indicador de estabilidad es una práctica de control directamente asociada con el buen desempeño de las etapas acidogénica y metanogénica (53). En este estudio, y dado el régimen térmico de Villa Mercedes, se adopta operación mesofílica con TRS = 20 días como base para el dimensionamiento.

En este contexto, Vanegas et al. (53) plantean que utilizar tecnologías avanzadas de monitoreo facilita observar parámetros decisivos, como la relación de ácidos volátiles (FOS/TAC) y el nivel del pH (Figura 10), lo cual ayuda a detectar posibles inconvenientes antes de que afecten de manera marcada la generación de biogás; por ejemplo, revisar frecuentemente el pH sirve para prevenir condiciones excesivamente ácidas que puedan frenar la actividad de los microorganismos encargados de producir metano, lo cual disminuye directamente la cantidad obtenida de este gas.

En relación con el mantenimiento, conviene centrar la atención en la mejora continua del funcionamiento del biodigestor; Paladino et al. (54) mencionan que la limpieza frecuente y la revisión regular de los elementos que componen el equipo permiten evitar atascos y garantizan un flujo continuo de los residuos. Conviene también ajustar la carga orgánica según la temporada del año o según la cantidad de residuos disponibles (37); contar con un sistema eficiente de monitoreo, que informe oportunamente a quienes operan el biodigestor sobre cambios en los parámetros establecidos, favorece una mejor operación y rentabilidad de estos sistemas pequeños, haciendo que la producción energética sea confiable y económica.



**Figura 10** Variación del pH y de la relación FOS/TAC durante la DA. Adaptado de “*Pilot-Scale Anaerobic Digestion of Pig Manure with Thermal Pretreatment: Stability Monitoring to Improve the Potential for Obtaining Methane*”(53)

#### 4.1.2.10 Ventajas y Limitaciones Técnicas del Sistema de Biomasa

Uno de los principales beneficios del sistema de biomasa es su capacidad para aprovechar los residuos orgánicos generados localmente, como el estiércol bovino, para producir biogás. Desde el punto de vista técnico, su principal ventaja es que, siempre que exista disponibilidad regular de sustrato, el biodigestor puede operar de forma prácticamente continua y no depende de las variaciones de las condiciones climáticas (28). La conversión de residuos orgánicos en energía contribuye a la sostenibilidad de los sistemas productivos y a la reducción de la huella de carbono (33).

A nivel económico, la biomasa presenta ventajas para los pequeños productores, ya que les permite generar su propia energía a partir de los residuos orgánicos que ya producen, y como consecuencia este sistema reduce los costos operativos, en particular al reemplazar el uso de energía convencional o combustibles fósiles. La posibilidad de usar el digestato (subproducto de la biodigestión) como fertilizante orgánico cierra el ciclo de los residuos, mejorando la productividad agrícola sin necesidad de comprar fertilizantes químicos, lo que genera ahorros adicionales (26). Así, la biomasa contribuye a reducir la dependencia de recursos externos, mejorando la eficiencia operativa a largo plazo(5).

Sin embargo, el sistema de biomasa presenta limitaciones técnicas que deben ser consideradas, principalmente la dependencia de los residuos orgánicos, debido a que la producción de biogás está vinculada con la cantidad y calidad de los residuos disponibles, lo que puede limitar su rendimiento en fincas que no generen suficientes desechos o que tengan condiciones operativas inadecuadas (41). En fincas con un número reducido de animales o menos residuos orgánicos, el sistema podría no ser capaz de generar suficiente biogás para cubrir toda la demanda energética. Esto implica que las condiciones locales y la capacidad de gestión de los residuos deben ser cuidadosamente evaluadas para garantizar el éxito del sistema (55). Dicho esto, el tipo de biodigestor y la co-digestión de varios residuos pueden mejorar el rendimiento, pero también aumentan la complejidad operativa (38).

### **4.1.3 Sistemas de Energía Solar Fotovoltaica**

#### **4.1.3.1 Concepto de Energía Solar Fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica se refiere a la conversión directa de la luz solar en electricidad mediante el uso de celdas fotovoltaicas. Este proceso se basa en el efecto fotovoltaico, que ocurre cuando la luz solar incide sobre un material semiconductor, liberando electrones que generan una corriente eléctrica. Según Lazaroiu et al. (58), los paneles solares fotovoltaicos están diseñados para capturar la radiación solar y convertirla en electricidad, contribuyendo así a la sostenibilidad energética. De acuerdo con Obaideen et al. (59), la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos depende en gran medida del tipo de material semiconductor utilizado, siendo el silicio cristalino el más común por su alta eficiencia y longevidad.

La eficiencia promedio de los paneles fotovoltaicos comerciales varía entre un 15 % y un 22 %, dependiendo del tipo de panel y las condiciones de instalación (4). El uso de energía solar fotovoltaica ofrece una reducción considerable en la huella de carbono y la dependencia de fuentes de energía no renovables, al mismo tiempo que minimiza los costos operativos a largo plazo (60). Esta tecnología se ha convertido en una opción viable para regiones rurales (38), como la finca Villa Mercedes, donde la implementación de sistemas fotovoltaicos podría permitir la autosuficiencia energética y mejorar la competitividad del sector agropecuario.

En la literatura colombiana, la Guía de biogás para el sector porcícola reporta que los biodigestores plásticos artesanales de 10 a 55 m<sup>3</sup> implican inversiones iniciales de alrededor de 2,6 a 8,1 millones de COP, con costos anuales de operación y mantenimiento del orden de 0,6 a 1,5 millones de COP; así como para biodigestores plásticos comerciales de 8–12 m<sup>3</sup>, los costos totales de inversión se sitúan entre 5,5 y 6,5 millones de COP (61) Estos valores muestran que el costo inicial de instalación y los gastos recurrentes pueden constituir una barrera importante para pequeños productores como la finca Villa Mercedes (5).

#### **4.1.3.2 Componentes Esenciales de los Sistemas Fotovoltaicos**

##### **Paneles Fotovoltaicos**

Los paneles fotovoltaicos son dispositivos que convierten la radiación solar en electricidad mediante el uso de celdas fotovoltaicas. Estas celdas están hechas principalmente de silicio cristalino, material semiconductor que ofrece una buena eficiencia de conversión. Al y Ansari (62) explican que los paneles solares están formados por capas de silicio que permiten la captura de la energía luminosa, transformándola en corriente continua (CC). La composición básica de un panel fotovoltaico incluye capas de silicio cristalino, que se presenta en dos formas: monocristalino y policristalino.

Los paneles monocristalinos suelen ofrecer mayor eficiencia, con valores aproximados entre 18 % y 22 %, lo que permite generar más energía por metro cuadrado; sin embargo, tienden a ser más costosos que los policristalinos, cuya eficiencia suele ubicarse entre 15 % y 18 % (63). Esta diferencia resulta especialmente relevante cuando la instalación se realiza en techo, ya que la superficie disponible en cubierta constituye una restricción de diseño y puede estar condicionada por la geometría de la estructura, zonas de sombra y criterios de carga y seguridad (4). En la finca Villa Mercedes, donde se proyecta la instalación sobre cubierta, la selección de módulos puede orientarse a maximizar la potencia instalada por unidad de área, considerando que los paneles monocristalinos se comercializan comúnmente con potencias nominales del orden de 300 a 400 Wp por panel, mientras que los policristalinos suelen ubicarse entre 250 y 300 Wp (58). No obstante, la energía anual generada dependerá de la

irradiación disponible, la orientación e inclinación del techo y las pérdidas del sistema, además de la potencia nominal instalada.

*Tabla 5 Comparativa entre paneles monocristalinos y policristalinos*

<b>Tipo de Panel</b>	<b>Eficiencia (%)</b>	<b>Costo Aproximado</b>	<b>Generación Promedio por Panel de área comparable (Wp)</b>
Monocristalino	18 - 22	Alto	300 - 400 Wp
Policristalino	15 - 18	Bajo	250 - 300 Wp

Nota: Adaptado de (58)

La vida útil de los paneles solares fotovoltaicos es de aproximadamente 25 a 30 años, aunque su rendimiento puede disminuir en un 0,5 % anual debido a factores como el clima y la acumulación de polvo, lo que es especialmente importante en zonas rurales donde la limpieza de los paneles no siempre se realiza de manera regular (64). En términos de costos, el precio de los paneles monocristalinos ha disminuido un 70 % en los últimos diez años, lo que ha facilitado su implementación en proyectos rurales de energización (59). Estos avances permiten a las fincas rurales como la Villa Mercedes acceder a tecnologías más eficientes y asequibles.

### **Controlador de Carga**

Los controladores solares son dispositivos que regulan la carga y descarga de las baterías, protegen el sistema y gestionan el funcionamiento eléctrico del sistema fotovoltaico para un aprovechamiento adecuado de la energía generada (65). Los controladores PWM (modulación por ancho de pulso) son económicos y adecuados para sistemas pequeños, mientras que los controladores MPPT (seguimiento del punto de máxima potencia) suelen ser más eficientes y permiten un mejor rendimiento bajo condiciones de radiación variable. En comparación con PWM, el uso de MPPT puede incrementar la energía aprovechable en determinadas condiciones de operación, especialmente cuando existen variaciones de irradiación y temperatura (66).

El controlador de carga cumple un papel clave en la operación del sistema fotovoltaico al definir y aplicar los umbrales de carga y descarga del banco de baterías, evitar la sobrecarga y la sobredescarga, y activar protecciones ante condiciones como sobrecorriente, cortocircuito o inversión de polaridad. Además, puede incorporar funciones de compensación por temperatura, etapas de carga (bulk-absorción-flotación) y desconexión por bajo voltaje, lo que contribuye a proteger el banco de baterías y a mejorar su vida útil (65). En este sentido, aunque la diferencia de costos entre tecnologías (PWM y MPPT) ya fue descrita, estas funciones de control también tienen implicaciones económicas, al reducir riesgos de deterioro prematuro de las baterías y, por tanto, posibles costos de reposición y mantenimiento del sistema (67).

En zonas con alta radiación solar durante el mediodía, un sistema MPPT puede ajustar automáticamente la energía recolectada, maximizando la eficiencia del sistema (66). Este tipo de controlador, aunque más caro, es particularmente recomendable para sistemas más grandes, ya que optimiza la recolección de energía, en climas donde las horas de sol y la radiación solar son variables (68). Por su parte, los controladores PWM suelen ser adecuados para configuraciones pequeñas y de menor complejidad; sin embargo, su desempeño puede ser inferior al de MPPT cuando las condiciones de operación no son constantes, por lo que la elección entre ambas tecnologías debe basarse en el balance costo-beneficio del sistema para la finca (69).

## **Baterías**

Las baterías son componentes esenciales en los sistemas fotovoltaicos off-grid (aislados), ya que permiten almacenar la energía generada durante el día para su uso durante la noche o en días nublados. Las baterías de ácido-plomo son las más comunes debido a su costo relativamente bajo, aunque su vida útil es limitada, generalmente entre 3 y 5 años, y su eficiencia de carga ronda el 80 % (70). Estas baterías requieren un mantenimiento regular y son menos eficientes en ciclos de carga profunda, lo que puede aumentar los costos

operativos a largo plazo. Según Soomar et al. (4), las baterías de ácido-plomo tienen un costo por ciclo de aproximadamente \$0,15 - \$0,20 por ciclo de carga. Sin embargo, su ciclo de vida relativamente corto y la necesidad de mantenimiento frecuente pueden resultar en costos adicionales a largo plazo (67).

En cambio, las baterías de ion-litio tienen una vida útil considerablemente más larga (8 a 10 años) y ofrecen una mayor eficiencia de carga, generalmente superior al 90 % (71). Aunque las baterías de ion-litio presentan un costo inicial más alto, con precios que rondan los \$400 - \$600 (kWh nominal) (71), su mayor eficiencia y durabilidad las convierten en una alternativa competitiva en proyectos a largo plazo. En contraste, las baterías de plomo-ácido suelen presentar un menor costo inicial: en la literatura se reportan precios tan bajos como 200 - 220 USD/kWh y, para un sistema de referencia, un costo de batería DC del orden de 236 USD/kWh (72), (73). Sin embargo, su desempeño puede ser inferior (eficiencia ida-y-vuelta típicamente 75–84 %) y su vida útil depende fuertemente de la profundidad de descarga, lo que puede aumentar el costo por kWh útil entregado (72), (73). De acuerdo con Gevorkov et al. (63), las baterías de ion-litio también presentan una tasa de autodescarga más baja, por lo que pierden menos carga durante periodos sin uso. En el caso de la finca Villa Mercedes, donde se prevé un uso constante, las baterías de ion-litio resultan recomendables por su capacidad de ofrecer mayor almacenamiento efectivo durante los periodos de alta irradiancia.

En términos de capacidad por peso y por volumen, las baterías de plomo-ácido presentan densidades de energía del orden de 35 Wh/kg ( $\approx 35$  kWh/t) y 60–90 Wh/L ( $\approx 60$ –90 kWh/m<sup>3</sup>) (74), mientras que las de ion-litio alcanzan rangos superiores ( $\approx 140$ –300 Wh/kg y  $\approx 200$ –700 Wh/L), lo que reduce significativamente la masa y el espacio requerido para una misma energía almacenada (75). En entornos rurales, la selección incorpora la disponibilidad de repuestos y la presencia de personal con experiencia en mantenimiento de sistemas de plomo-ácido, dado su uso extendido en aplicaciones automotrices e industriales; no obstante, para contextos estos contextos deben considerarse la disponibilidad de repuestos y personal de mantenimiento de plomo-ácido con tecnología (74), frente a la mayor complejidad de gestión

y protección asociada al uso de BMS en sistemas ion-litio (75). Por ello, la selección final se justifica mejor mediante una comparación técnico-económica por escenarios (con y sin baterías) y con base en energía útil (DoD) y reemplazos (74), (75).

Con el fin de que la comparación entre tecnologías de almacenamiento no se limite a costo y vida útil, en el caso de la finca Villa Mercedes es pertinente incorporar criterios de capacidad por masa y por volumen, debido a que el almacenamiento requerido para respaldar la operación depende no solo de la energía demandada, sino también del espacio disponible, las condiciones de instalación y la logística de operación y mantenimiento. En este sentido, el dimensionamiento preliminar del banco de baterías puede formularse a partir de la energía de respaldo requerida y luego relacionarse con la densidad energética gravimétrica (Wh/kg) y volumétrica (Wh/L) de cada tecnología, lo cual permite comparar, de forma conceptual, el peso y el volumen aproximado asociados a un mismo requerimiento energético.

#### **Energía de respaldo requerida (kWh):**

$$E_{\text{respaldo}}(kWh) = P_{\text{critica}} (Kw) \times t_{\text{autonomia}}(h)$$

donde  $P_{\text{critica}}$  es la potencia de las cargas esenciales y  $t_{\text{autonomia}}$  el tiempo objetivo de respaldo.

#### **Conversión a energía útil considerando profundidad de descarga y eficiencia:**

$$E_{\text{útil}} = E_{\text{nominal}} \times DoD \times \eta$$

Donde DoD es la profundidad de descarga operativa recomendada y  $\eta$  la eficiencia del sistema de almacenamiento.

#### **Masa aproximada del banco de baterías (comparación por kg):**

$$m (kg) = \frac{E_{\text{nominal}} (Wh)}{\rho_{E, m} (Wh/kg)}$$

Donde  $\rho E, m$  es la densidad energética gravimétrica (Wh/kg) reportada para cada tecnología.

**Volumen aproximado del banco de baterías (comparación por espacio):**

$$V (L) = \frac{E_{nominal} (Wh)}{\rho E, V (Wh/L)}$$

donde  $\rho E, V$  la densidad energética volumétrica (Wh/L) reportada para cada tecnología

Con estas expresiones se puede comparar, para una misma energía requerida, el peso y el espacio aproximado del banco de baterías en plomo-ácido y en ion-litio, además de evaluar la diferencia entre capacidad nominal y útil (DoD y eficiencia).

Se presenta una síntesis comparativa entre baterías de plomo-ácido e ion-litio orientada a criterios de selección para almacenamiento estacionario en la finca Villa Mercedes. El cuadro integra parámetros de densidad energética, eficiencia, profundidad de descarga, requerimientos de gestión y supuestos de costo usados en evaluaciones tecno económicas. Por una parte, los rangos de desempeño técnico provienen de fichas tecnológicas que reportan valores típicos por tecnología (74), (75). Por otra parte, los rangos de costos y variables de desempeño económico se apoyan en reportes metodológicos para análisis de almacenamiento en red (72), (73).

**Tabla 6** Comparación técnico-operativa entre baterías de plomo-ácido y ion-litio para almacenamiento estacionario en la finca Villa Mercedes

<b>Criterio</b>	<b>Plomo-ácido</b>	<b>Ion-litio</b>	<b>Implicación para la finca Villa Mercedes</b>
<b>Costo referencial de inversión USD/kWh</b>	Rangos reportados para aplicaciones estacionarias, según metodología y tamaño del sistema (72), (73)	Rangos reportados para aplicaciones estacionarias, según metodología y tamaño del sistema (72), (73)	El análisis financiero debe usar la misma base de costos para comparar escenarios. Conviene explicitar si el valor corresponde a batería o a sistema instalado.
<b>Energía específica Wh/kg</b>	35 Wh/kg (74)	140–300 Wh/kg (75)	A igual energía requerida, el banco en ion-litio tiende a

			requerir menos masa. El banco en plomo-ácido demanda mayor soporte físico y logística de manipulación.
<b>Densidad volumétrica Wh/L</b>	60–90 Wh/L (74)	200–700 Wh/L (75)	A igual energía requerida, el ion-litio tiende a ocupar menos espacio. El plomo-ácido puede requerir un área dedicada y condiciones de instalación acordes con su tecnología.
<b>Eficiencia ida y vuelta porcentaje</b>	Rango típico reportado para la tecnología en almacenamiento estacionario (74)	Rango típico reportado para la tecnología en almacenamiento estacionario (75)	La eficiencia afecta la energía útil disponible y las pérdidas internas. El modelo económico debe reflejar esa diferencia en energía entregada.
<b>Profundidad de descarga DoD operativa</b>	Rangos operativos reportados, con impacto directo en vida útil (74)	Rangos operativos reportados, con impacto directo en vida útil (75)	El DoD define la capacidad útil. Un DoD más conservador exige mayor capacidad nominal para cubrir la misma energía útil.
<b>Vida útil en ciclos y dependencia del DoD</b>	La vida útil disminuye cuando el DoD aumenta, según rangos reportados (74)	La vida útil depende del control, la temperatura y el perfil de operación, según rangos reportados (75)	La frecuencia de reemplazo cambia el OPEX y el ROI. El escenario económico debe incluir reposición de baterías cuando aplique.
<b>Gestión y protección del sistema</b>	Requiere control de carga y prácticas operativas acordes con la tecnología (74)	Requiere BMS para monitoreo y protección del banco (75)	El ion-litio exige integración de BMS y coordinación de protecciones. La operación depende del soporte del proveedor y de la capacidad de diagnóstico en sitio.
<b>Requerimientos de instalación y operación</b>	Consideraciones de instalación y operación propias de la tecnología (74)	Consideraciones de instalación y operación, con atención a gestión térmica y	El diseño del cuarto técnico debe incorporar los requerimientos de cada tecnología y sus restricciones de seguridad.

		electrónica de control (75)	
<b>Parámetros para modelación tecno económica</b>	Costos y parámetros de desempeño utilizados en evaluaciones comparativas (72), (73)	Costos y parámetros de desempeño utilizados en evaluaciones comparativas (72), (73)	La comparación por escenarios debe sostenerse en una fuente homogénea de supuestos para CAPEX, OPEX, eficiencia, degradación y reemplazos.
<b>Implicación para el análisis por escenarios</b>	Apto para escenario con baterías, con reposición según vida útil reportada (72), (74)	Apto para escenario con baterías, con reposición y control mediante BMS (72), (75)	Conviene comparar tres escenarios con supuestos iguales. PV conectado a red sin baterías, PV con plomo-ácido, PV con ion-litio. El ROI debe calcularse con energía útil y reposiciones.

Nota. Elaboración propia con información tomada de (72), (73), (74), (75)

El escenario A considera un sistema fotovoltaico conectado a red sin almacenamiento, bajo el supuesto de continuidad del servicio y ausencia de una meta de autonomía. En consecuencia, el dimensionamiento prioriza el ajuste entre generación horaria y perfil de carga, con énfasis en autoconsumo y reducción de compras a la red. Por su parte, la evaluación técnica registra energía generada, fracción de autoconsumo y excedentes, de modo que el caso funcione como línea de referencia para comparar configuraciones con baterías. Este enfoque es consistente con análisis de modelación de sistemas detrás del medidor reportados por NREL (76).

El Escenario B incorpora almacenamiento con baterías de plomo ácido acopladas al sistema fotovoltaico, con operación orientada a desplazar consumo nocturno y cubrir variaciones cortas de carga. Por ello, el planteamiento del banco se describe con capacidad nominal, DoD operativo y eficiencia ida y vuelta, parámetros que condicionan energía y vida útiles (74). A su vez, el modelo económico incluye reposición del banco según ciclos esperados y costos de referencia para aplicaciones estacionarias(72), (73). Esta configuración se analiza con

criterios de disponibilidad de repuestos y soporte técnico local, frecuentes en tecnologías difundidas en entornos rurales (74).

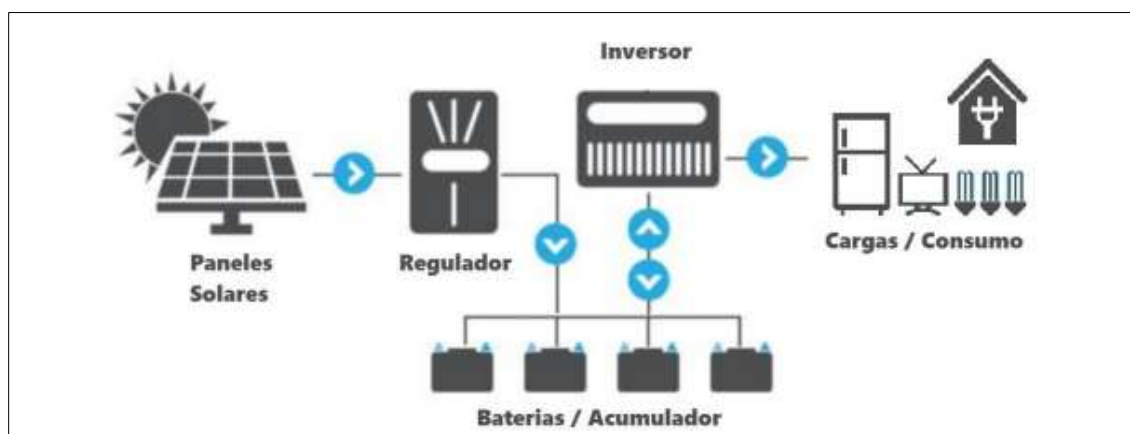
El Escenario C incorpora almacenamiento con baterías de ion-litio, con gestión mediante BMS para monitoreo, balanceo y protecciones del banco durante carga y descarga (75). En esa línea, el planteamiento del sistema considera densidad energética por masa y por volumen, eficiencia ida y vuelta y rangos operativos de DoD, con efectos directos sobre energía útil (75). Por consiguiente, el análisis económico incorpora costos de referencia, reposiciones esperadas y requerimientos de control asociados a la integración electrónica del sistema (72), (73). La comparación con el Escenario B identifica ventajas logísticas por menor masa y volumen instalados, y limita la discusión a supuestos homogéneos entre escenarios (75).

La comparación económica organiza los tres escenarios con un mismo horizonte de evaluación, una tasa de descuento definida y una tarifa base de energía, de acuerdo con la metodología del estudio. Luego, el cálculo separa CAPEX en inversión inicial y OPEX en costos de operación y mantenimiento, e incorpora reemplazos cuando la vida útil de componentes lo exige (72), (73). En consecuencia, el indicador de retorno se calcula con energía útil entregada y con el ahorro anual estimado frente a la compra a red, bajo supuestos equivalentes. Este enfoque coincide con reportes que modelan PV con y sin baterías y con comparaciones de costos nivelados en sistemas energéticos (76), (77).

La selección de tecnología de almacenamiento se plantea como decisión condicionada por restricciones del sitio y por el desempeño obtenido en la evaluación por escenarios. El ion-litio resulta conveniente cuando el espacio disponible y la masa instalable son limitados, y cuando el operador cuenta con soporte para supervisar el BMS y el DoD (75). En contraste, el plomo ácido resulta conveniente cuando el acceso a repuestos y personal de mantenimiento orienta la operación, y cuando la inversión inicial se ajusta a la capacidad financiera del proyecto (74). Por lo tanto, la recomendación remite al escenario con mejor retorno y con requerimientos operativos compatibles con la finca Villa Mercedes.

## Tipos de Sistemas Solares Fotovoltaicos

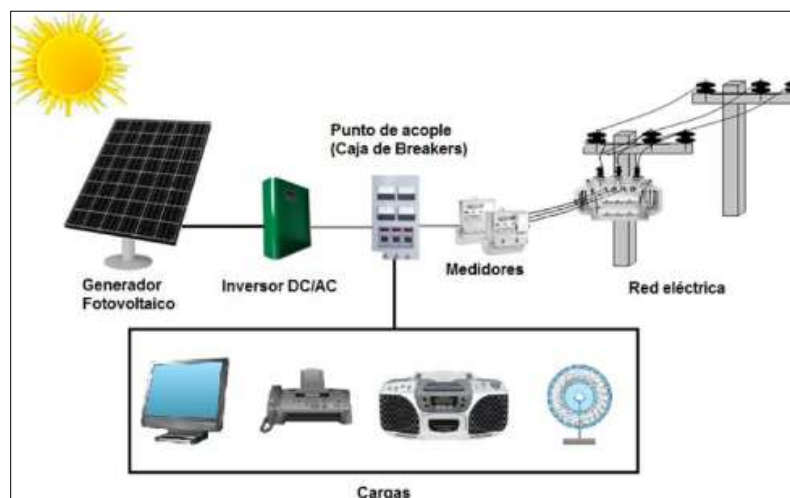
Existen dos tipos principales de sistemas solares fotovoltaicos: aislados (Off-grid) y conectados a la red (On-grid). Los sistemas Off-grid no están conectados a la red eléctrica pública, lo que los hace ideales para zonas rurales o remotas donde no existe acceso a la infraestructura eléctrica convencional (Figura 11). Estos sistemas requieren baterías para almacenar la energía generada durante el día y utilizarla por la noche o en días de baja irradiación (84). Un sistema off-grid típico puede requerir entre 4 y 6 horas de sol pico diario para cubrir las necesidades energéticas de una finca pequeña, según la irradiación del lugar y la potencia pico instalada (59).



*Figura 11 Esquema sistema fotovoltaico off-grid.*

Los sistemas on-grid, en cambio, están interconectados con la red eléctrica y permiten el intercambio de energía, lo que facilita el suministro continuo y genera ingresos mediante la venta de excedentes (Figura 12). De acuerdo con Lazaroiu et al. (58), los sistemas on-grid son más comunes en áreas con acceso a la red eléctrica, mientras que los off-grid son esenciales para comunidades rurales donde la infraestructura eléctrica no es viable.

El sistema on-grid no requiere baterías para garantizar continuidad, dado que la red cubre la demanda cuando no hay generación (85). En un sistema on-grid la red eléctrica actúa como respaldo y recibe excedentes de generación. El Departamento de Energía de Estados Unidos indica que, cuando el recurso renovable no está disponible, la red cubre la demanda y se evita el gasto en equipos de almacenamiento como baterías (85). Esta condición reduce el costo por potencia instalada frente a configuraciones off-grid. NREL estima para un sistema residencial de 8 kWdc un costo de 2,68 USD/Wdc sin almacenamiento y de 4,70 USD/Wdc cuando se integra un sistema de 12,5 kWh (86). En escala utility, el benchmark pasa de 1,17 a 2,13 USD/Wdc (86).



**Figura 12** Esquema sistema fotovoltaico on-grid. Adaptado de “*Harnessing solar energy for the Academic Area of the Police Aviation School through a photovoltaic system with grid connection*” (87)

La eficiencia del módulo fotovoltaico se asocia con la conversión de irradiancia en potencia en corriente continua, por lo que suele reportarse con valores menores a 22 % según la tecnología considerada. En cambio, la eficiencia del inversor describe la conversión de potencia en corriente continua a corriente alterna y se reporta con rangos cercanos a 95 % y 98 % en equipos comerciales (88). Como referencia, la ficha técnica del microinversor Enphase IQ 7X registra una eficiencia ponderada CEC de 97,5 % (89). Esta distinción evita

confusiones cuando se presenta el esquema de interconexión y se reportan parámetros de desempeño.

## **Inversores**

Los inversores son dispositivos que convierten la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA), necesaria para alimentar los equipos eléctricos convencionales. Según Tawalare (78) existen dos tipos de inversores: onda modificada y onda pura. Los inversores de onda pura son los más recomendados para aplicaciones en las que se utilizan equipos sensibles, ya que proporcionan una salida de energía más limpia y estable, con una eficiencia que varía entre 90 % y 98 % (79). Estos inversores, sin embargo, son más costosos (80). En cambio, los inversores de onda modificada son más baratos, pero tienen la limitación de que no son adecuados para dispositivos que requieren una calidad de energía constante, como algunos equipos de telecomunicaciones o electrodomésticos sensibles (4). A pesar de ser más económicos, los inversores de onda modificada son adecuados para aplicaciones de baja potencia en áreas rurales, donde los equipos conectados no son tan sensibles a las fluctuaciones de voltaje (66).

La diferencia entre onda pura y onda modificada puede expresarse mediante la distorsión armónica total de la tensión. Mohammed (81) reporta valores de THD cercanos a 3 % para una salida senoidal, mientras una forma de onda modificada puede superar 20 % y, en un caso de estudio, alcanzar 28,96 % según el ángulo de conmutación (82). En concordancia con ese criterio, IEEE 519 recomienda mantener la THD de tensión alrededor de 5 % en el punto de acoplamiento común (82). Este comportamiento se asocia con un mayor riesgo de operación no deseada en cargas con electrónica de control. En catálogos para 1000 W se reportan valores cercanos a 150 USD en onda modificada (83) y a 416 USD en onda pura (83), lo que respalda la diferencia de costo.

### **4.1.3.3 Dimensionamiento Básico**

#### **Horas Sol Pico (HSP)**

Las horas sol pico representan un equivalente diario de energía solar que orienta el dimensionamiento fotovoltaico y permite comparar la oferta del recurso entre sitios. El indicador se define como tiempo equivalente con irradiancia constante de  $1 \text{ kW/m}^2$  que entrega la energía diaria, por lo que 1 HSP equivale a  $1 \text{ kWh/m}^2$ . En Colombia, el Atlas de Radiación Solar elaborado por IDEAM y UPME presenta mapas de radiación global y reporta valores medios del orden de  $4,5 \text{ kWh/m}^2$  por día (90). Para la finca Villa Mercedes, el valor de HSP se tomará del mapa correspondiente al área de Palermo, Huila, y se contrastará con NASA POWER mediante una consulta puntual para Palermo (91).

Este valor es importante para determinar la potencia de los sistemas fotovoltaicos, ya que de él depende la cantidad requerida de paneles solares para generar la electricidad necesaria. Según Galvís et al. (92), una correcta estimación de las HSP permite calcular con precisión la cantidad de energía que un sistema solar puede generar y ajustarlo a las necesidades de la finca. Además, Muñoz et al. (93) mencionan que la variabilidad de la radiación solar durante el día y el año debe ser considerada en el dimensionamiento para evitar subdimensionamientos que afecten la continuidad del suministro energético.

#### **Cálculo de Demanda Energética Diaria**

El cálculo de la demanda energética diaria es un paso clave en el proceso de dimensionamiento, ya que permite establecer cuánta energía requiere la finca para operar de manera confiable y, además, identificar las cargas críticas y los periodos de mayor consumo. Para la finca Villa Mercedes, la demanda se determinó con base en información primaria del predio (registro histórico de consumo y caracterización de equipos), de modo que el dimensionamiento se sustente en condiciones reales de operación. En el periodo enero de 2024 a marzo de 2025, el consumo histórico mensual osciló entre 77 y 88 kWh/mes, evidenciando variaciones asociadas a cambios operativos y uso intermitente de equipos.

Con el fin de corroborar el consumo observado y construir el escenario de tecnificación, se aplicó un enfoque “bottom-up” mediante un inventario de cargas (cuadro de cargas), registrando para cada equipo: cantidad, potencia nominal (W), horas de uso y frecuencia de utilización. Como resultado, el consumo eléctrico actual inventariado asciende a 88.038 Wh/mes ( $\approx 88,038$  kWh/mes). Posteriormente, para el escenario proyectado se incorporaron los nuevos equipos asociados a la tecnificación (ordeño mecánico, cerca eléctrica, báscula electrónica y máquina ensiladora), los cuales aportan un consumo adicional estimado de 150.969 Wh/mes ( $\approx 150,9$  kWh/mes). De esta forma, el balance total de la finca (actual + proyectado) corresponde a 239.007 Wh/mes ( $\approx 239,007$  kWh/mes), equivalente a 7,97 kWh/día.

Para convertir el consumo mensual a demanda diaria promedio, se emplea la relación

$$E_{\text{día}} = \frac{E_{\text{mes}}}{30}$$

No obstante, para fines de dimensionamiento no basta con conocer la energía (kWh/día): también es necesario evaluar la potencia pico simultánea (W) y la posible coincidencia de cargas en ventanas operativas críticas como ordeño e iluminación. En el balance total, la finca presenta una potencia pico estimada de 9.601 W, valor determinante para la selección de inversor, protecciones y/o generador (Tabla 10). Este enfoque es consistente con guías de dimensionamiento de sistemas FV aislados, que recomiendan considerar no solo la energía diaria sino también ciclos de trabajo, simultaneidad y cargas de arranque (“surge loads”).

En el escenario de tecnificación, se observa que las cargas con mayor incidencia energética son la máquina ensiladora ( $\approx 96.444$  Wh/mes,  $\sim 55$  % del consumo adicional) y el ordeño mecánico ( $\approx 67.500$  Wh/mes,  $\sim 39$  % del consumo adicional). Adicionalmente, estas cargas incluyen motores eléctricos, por lo que el dimensionamiento del inversor/generador ante picos de arranque, donde para la ensiladora se reporta potencia de 7 kW, y para el sistema de ordeño una potencia de motor de 0,75 kW (1 HP).

Finalmente, tal como recomiendan Grisales et al. (94), se incorpora un margen adicional de seguridad para cubrir incertidumbres de operación como variaciones en tiempo de uso, simultaneidad no prevista y condiciones reales de trabajo, especialmente en procesos con picos como ordeño y ensilaje. Este margen debe declararse explícitamente y aplicarse tanto a la energía diaria como a la potencia pico, de manera que el sistema pueda cubrir adecuadamente las necesidades energéticas en condiciones reales de operación, tal como señalan Soomar et al. (4) ] al resaltar la importancia de una estimación robusta para asegurar el suministro.

#### **4.1.3.4 Ventajas y Limitaciones Técnicas del Sistema Solar Fotovoltaico**

La energía fotovoltaica es una fuente de energía limpia y renovable que no genera emisiones contaminantes, lo que la convierte en una solución clave para la reducción de gases de efecto invernadero. Según el análisis de Pérez y Alonso (99), este tipo de energía contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático al evitar la quema de combustibles fósiles. Además, la energía fotovoltaica permite ahorros económicos a largo plazo, ya que una vez que se ha cubierto la inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento son bajos (100). El sistema fotovoltaico genera energía suficiente para cubrir la demanda de equipos en fincas rurales, lo que reduce la dependencia de redes eléctricas tradicionales y ofrece independencia energética (4). Esto es especialmente beneficioso en zonas rurales, como la finca Villa Mercedes, donde el acceso a la red eléctrica es limitado o poco confiable (101).

Una de las principales limitaciones técnicas de los sistemas fotovoltaicos es la variabilidad del recurso solar, dado que la producción depende de la irradiancia incidente, la cual cambia a lo largo del día y entre estaciones. En términos operativos, la generación fotovoltaica ocurre principalmente durante las horas de radiación solar; en ausencia de irradiancia (por ejemplo, durante la noche) la producción es nula, y bajo condiciones de nubosidad puede disminuir de manera significativa (99). Según Soomar et al. (4), esta intermitencia puede generar

desajustes entre generación y demanda, por lo que en sistemas aislados (off-grid) suele requerirse almacenamiento para garantizar continuidad del suministro (94).

No obstante, la incorporación de baterías incrementa los costos iniciales de instalación, lo cual puede constituir una barrera para proyectos en zonas rurales con presupuestos limitados. En este sentido, el sistema de almacenamiento suele representar una fracción relevante del costo total del sistema fotovoltaico. En cuanto a la tecnología de almacenamiento, las baterías de plomo-ácido suelen presentar menor costo inicial, pero una vida útil y desempeño inferiores en comparación con baterías de ion-litio, que típicamente ofrecen mayor eficiencia y vida útil, aunque con una inversión inicial más alta (72), (75).

El costo inicial de instalación de un sistema fotovoltaico es uno de los principales obstáculos para su adopción, especialmente en áreas rurales donde los recursos económicos son limitados. Azevedo et al. (102) reportan, con base en IRENA (2019), valores promedio de costo total instalado del orden de 1.830,88 USD/kW para sistemas residenciales y 1.604,25 USD/kW para sistemas comerciales, evidenciando que la inversión inicial puede ser significativa y variar según el segmento y el contexto de implementación.

De manera complementaria, informes internacionales señalan que los precios de sistemas fotovoltaicos residenciales pueden ubicarse dentro de rangos amplios según el país y el tipo de mercado. El reporte IEA-PVPS (103) indica que, en 2023, el precio típico de sistemas residenciales se encontró entre 0,78 y 2,6 USD/W. En consecuencia, un sistema de 5 kW (5.000 W) puede estimarse aproximadamente entre 3.900 y 13.000 USD, y en mercados ubicados hacia la franja baja ( $\approx 1,0 - 1,4$  USD/W) el costo total puede oscilar alrededor de 5.000–7.000 USD para 5 kW (cálculo por conversión directa de USD/W a W).

Este costo inicial elevado puede compensarse parcialmente mediante la reducción de la factura eléctrica a lo largo de la vida útil del sistema; sin embargo, la magnitud del ahorro

económico no es fija, ya que depende del nivel de autoconsumo, el perfil de demanda, la estructura tarifaria y el esquema de compensación de excedentes, por lo que varía entre proyectos y contextos regulatorios (104). En consecuencia, el tiempo de recuperación de la inversión (Payback) también puede presentar variaciones; por ejemplo, en estudios aplicados para sistemas fotovoltaicos conectados a red en Colombia se reportan periodos de retorno del orden de ~7–8 años bajo escenarios de autoconsumo, dependiendo de la configuración y la tecnología seleccionada (105). Aun así, para algunos productores rurales con restricciones de liquidez o acceso limitado a financiación, la inversión inicial puede continuar representando una barrera para la adopción del sistema (101).

A pesar de las limitaciones mencionadas, existen alternativas tecnológicas que pueden mejorar la viabilidad de los sistemas fotovoltaicos. La optimización del almacenamiento de energía mediante el uso de baterías de litio puede mitigar la intermitencia solar y mejorar la eficiencia del sistema, aunque a un costo más elevado (4).

Otra alternativa es la combinación de energía solar con otras fuentes renovables, como la biomasa o la energía eólica, lo que permitiría contar con una fuente continua de energía durante el día y la noche (97). La integración de sistemas híbridos ofrece una solución robusta para zonas rurales, donde la variabilidad de las fuentes renovables puede ser un desafío. Esta estrategia ha demostrado ser efectiva en zonas rurales de Colombia, donde los sistemas híbridos permiten cubrir las demandas energéticas incluso en condiciones de baja irradiación solar (94).

## **4.2 Estado del Arte**

### **4.2.1 A nivel Internacional**

#### **4.2.1.1 Biomasa**

La biomasa, utilizada como recurso renovable para producir biogás, ha llamado la atención en distintas investigaciones internacionales que analizan tanto su viabilidad técnica como

económica; en este contexto, Nwokolo et al. (55) indican que la selección del sustrato es un aspecto determinante para obtener buenos resultados en la generación de biogás, dado que residuos orgánicos específicos como estiércol de ganado, restos agrícolas o desechos alimentarios pueden afectar directamente la cantidad de metano obtenido; en su investigación, llevada a cabo en diversas regiones, lograron identificar que al optimizar ciertas condiciones operativas se alcanzaba hasta un 30 % más de producción, según el tipo particular de sustrato empleado.

En otra investigación específica en el Valle de Chillón, Perú, Castillo et al. (106) exploraron diversas mejoras en sistemas de biodigestión a pequeña escala; según sus resultados, en dicho contexto, los biodigestores llegan a generar entre 0,6 y 1,2 m<sup>3</sup> de biogás por kilogramo de material orgánico tratado; asimismo, estos investigadores calcularon que, en condiciones locales similares, instalar sistemas de producción de biogás podría abastecer aproximadamente la mitad del consumo energético requerido por pequeños agricultores; este hallazgo demuestra la importancia de adaptar adecuadamente esta tecnología según las particularidades locales.

Desde una perspectiva tecnológica, Arenas et al.(107) estudiaron cómo ha evolucionado la digestión anaeróbica, específicamente en relación con la optimización de los sistemas digestores bajo escenarios inciertos, incorporar tecnologías avanzadas, entre ellas tratamientos previos del sustrato o ajustar adecuadamente la relación carbono-nitrógeno, consigue elevar en aproximadamente un 40 % la generación de biogás; estos hallazgos resultan especialmente útiles al considerar propuestas de autogeneración a pequeña escala, como la que se quiere evaluar en la finca Villa Mercedes.

Diversos parámetros operacionales de los biodigestores y cómo estos afectan el rendimiento en la producción de biogás fueron revisados por Kalaiselvan et al. (108); en su estudio, hicieron énfasis en aspectos como la temperatura, el tiempo de retención hidráulica o la adecuada mezcla de los materiales, sugiriendo incluso la incorporación de sistemas asistidos

por energía solar para optimizar los resultados; según sus observaciones, aprovechar la energía solar en regiones con buena radiación podría mejorar hasta en un 20 % la producción total de biogás, lo cual sería especialmente útil en áreas rurales donde suelen presentarse limitaciones en términos de recursos energéticos disponibles.

En cuanto a la producción de biogás a partir de residuos agroindustriales, Neri et al. (109) examinan el potencial de residuos de alimentos y subproductos agrícolas para la generación de biometano. Los resultados del estudio, realizado en Italia, muestran que los residuos agrícolas como la paja de arroz y los restos de cultivos pueden generar entre 150 y 250 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de biomasa, con un contenido de metano de aproximadamente el 60 %. Esta investigación subraya el potencial de los residuos agrícolas como una fuente energética viable y accesible para la generación de biogás en áreas rurales con altos índices de producción agrícola.

El estudio de Díaz et al. (56) aborda la evaluación del potencial de biogás a partir de estiércol en el estado de Jalisco, México. El estudio indica que el estiércol de ganado tiene un rendimiento de producción de biogás de aproximadamente 20 m<sup>3</sup> por tonelada de estiércol, con una alta concentración de metano en el biogás generado. Además, se resalta que la implementación de sistemas de digestión anaeróbica en la región podría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, al tiempo que proporcionaría una fuente energética local, lo que resulta especialmente beneficioso para las zonas rurales donde el acceso a fuentes energéticas externas es limitado.

Por otra parte, Villarroel et al. (110) analizaron la capacidad de producir biogás en granjas lecheras ubicadas en América Latina; encontraron que aproximadamente un 70% de estas granjas podrían alcanzar la autosuficiencia energética al utilizar sistemas específicos de biogás. Según los resultados del estudio, cada granja podría generar diariamente entre 50 y 100 m<sup>3</sup> de biogás; esto dependería en gran medida de la cantidad de estiércol disponible y del tipo exacto de tecnología instalada. Este análisis pone en evidencia cómo la generación

de biogás puede ser una alternativa interesante para resolver problemas energéticos comunes en zonas rurales, vinculándose directamente con el enfoque propuesto en el presente proyecto.

Por otro lado, Schoeber et al. (111) exploraron cómo se adaptan pequeñas instalaciones de biogás en comunidades rurales africanas, en particular Etiopía, donde pequeños biodigestores podrían suministrar hasta 4 kW de electricidad por hogar. Según los investigadores, estos sistemas permitirían no únicamente producir energía limpia para uso doméstico, sino mejorar la calidad del suelo agrícola y reducir las emisiones contaminantes hacia la atmósfera; así queda clara la necesidad de adaptar este tipo de tecnologías según las condiciones propias de cada región. El estudio realizado por Schoeber y colaboradores abre entonces una perspectiva sobre cómo implementar estos sistemas para favorecer el desarrollo en contextos rurales específicos.

En este mismo sentido, Bumharther et al. (112) llevaron a cabo un estudio acerca del crecimiento en la industria del biogás en Europa; los autores indicaron que el uso combinado de estiércol con ciertos residuos agrícolas puede optimizar el rendimiento de los biodigestores de forma notable. De acuerdo con su investigación, en Europa la eficiencia de las instalaciones de biogás aumentó hasta un 15% en los últimos años; esto se logró gracias a la incorporación de mejoras tecnológicas como procesos digestivos optimizados o sistemas térmicos asistidos mediante energía solar. Dichos resultados plantean interesantes oportunidades que podrían aplicarse igualmente en iniciativas similares al proyecto que se propone para Villa Mercedes.

Por su parte Barragán et al. (113) realizó un estudio sobre la generación de energía a partir de biogás proveniente de vertederos en climas tropicales ecuatoriales. Su análisis muestra que la capacidad de generación de biogás en vertederos de estas regiones puede alcanzar hasta 150 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de residuos orgánicos, con un rendimiento de energía de aproximadamente 6 kWh por metro cúbico de biogás producido.

Finalmente, el estudio realizado por Montalvo et al. (114) en Chile sobre la producción de biogás en una bodega vinícola muestra que las instalaciones de biogás pueden generar hasta 250 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de residuos orgánicos, lo que podría satisfacer hasta el 30% de las necesidades energéticas de la instalación. Este tipo de investigaciones confirma la viabilidad de la biogeneración a pequeña escala en industrias específicas y sugiere la aplicabilidad de estos sistemas en sectores como el agrícola.

Con base en lo expuesto anteriormente, es posible afirmar que la producción de biogás mediante el uso de biomasa constituye una tecnología que evoluciona constantemente; esto ha permitido implementarla en contextos diversos y en múltiples regiones del planeta. Las investigaciones revisadas ofrecen información precisa sobre rendimientos específicos, variedades de biomasa disponibles y condiciones operativas necesarias para la implementación del sistema en la finca Villa Mercedes, considerando aspectos técnicos particulares del lugar y las necesidades energéticas que se presentan allí. En este sentido, los estudios previos refuerzan la idea de que cada solución tecnológica debe adaptarse a las circunstancias propias de la zona para lograr mejores resultados y satisfacer efectivamente la demanda energética local.

#### **4.2.1.1 Energía Solar Fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica ha mostrado avances en las últimas décadas, tanto en eficiencia como en aplicabilidad, Lameirinhas et al. (115) realizaron una revisión de los fundamentos y la evolución de la energía fotovoltaica, abarcando las tecnologías empleadas en los sistemas fotovoltaicos. Su estudio destacó el uso de materiales semiconductores y técnicas para optimizar la conversión de energía solar, subrayando que las innovaciones tecnológicas, tales como los materiales de alta eficiencia y las mejoras en las técnicas de fabricación, han logrado que los paneles solares alcancen eficiencias cercanas al 22%. Este análisis se convierte en una base sólida para el impulso de futuras innovaciones tecnológicas en regiones con alta radiación solar, como América Latina y África, abriendo nuevas oportunidades en contextos donde el acceso a energías renovables es esencial.

En el trabajo de Al-Ezzi y Ansari (62), los autores exploraron con profundidad las células solares fotovoltaicas, destacando su principio de funcionamiento, los materiales utilizados y los modelos matemáticos que fundamentan estos sistemas. Pusieron énfasis en los avances en el uso de perovskitas, que presentan un alto potencial para superar las limitaciones de los materiales tradicionales, como el silicio. Las células solares de perovskita han alcanzado eficiencias superiores al 25% bajo condiciones óptimas, lo que representa un avance significativo en este campo. Asimismo, resaltaron el progreso en el modelado matemático, que ha permitido una mejor previsibilidad del comportamiento de estos sistemas bajo diversas condiciones ambientales. A través de estas innovaciones, los sistemas fotovoltaicos se han vuelto más accesibles y eficientes, abriendo nuevas posibilidades en áreas rurales donde la adopción de energía solar podría transformar significativamente el acceso a la electricidad.

En cuanto a la integración de sistemas fotovoltaicos con motores eléctricos, Narendra et al. (80) analizaron cómo estos sistemas podrían mejorar la eficiencia energética en diversas aplicaciones industriales, como las bombas de agua. Utilizando algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), los investigadores mostraron cómo los sistemas fotovoltaicos optimizan su rendimiento en condiciones solares variables. Los resultados de su estudio indicaron que la combinación de paneles solares con motores eléctricos representa una opción viable para sistemas autónomos en áreas rurales aisladas. En este contexto, el uso de sistemas fotovoltaicos con seguimiento MPPT incrementó la eficiencia del sistema en un 30% en comparación con los sistemas tradicionales conectados a la red. Este hallazgo abre nuevas perspectivas para el uso de energía solar en la industria, además de contribuir a la reducción de la dependencia de fuentes de energía no renovables.

El estudio de El Hammoumi et al. (84) se centró en técnicas avanzadas para maximizar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, haciendo énfasis en el uso de seguidores solares. Su investigación reveló que estos sistemas aumentaron la producción de energía entre un 15% y un 30%, lo que supone una mejora considerable en la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en regiones con alta radiación solar. Se exploró, asimismo, el uso de paneles

solares flotantes, una opción innovadora que permite instalar sistemas fotovoltaicos en cuerpos de agua, sin ocupar espacio en tierra. Esta solución es particularmente útil en áreas urbanas o en lugares donde el espacio disponible es limitado, lo que mejora la rentabilidad de los sistemas fotovoltaicos y su aplicabilidad global.

El potencial de la energía fotovoltaica dentro del contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible fue analizado por Mohamed et al. (116), quienes destacaron su rol en la mitigación del cambio climático y su capacidad para generar energía limpia en zonas rurales. El estudio resaltó que la fotovoltaica puede tener un efecto positivo en la inclusión social y económica de las comunidades rurales al proporcionar acceso a una fuente de energía confiable. A pesar de que la adopción global de la fotovoltaica ha sido rápida, existen aún barreras económicas y tecnológicas que deben superarse para permitir su implementación en regiones en desarrollo. Este estudio propone estrategias para superar estos obstáculos y maximizar los beneficios socioeconómicos de la energía solar, lo que podría desempeñar un papel clave en el desarrollo rural.

Por su parte, la revisión de Tan y Mohamad (7) sobre la interrelación de los dispositivos en los sistemas fotovoltaicos identificó que mejorar los algoritmos de MPPT y optimizar los convertidores de energía son esenciales para incrementar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en aplicaciones que requieren un rendimiento confiable bajo condiciones solares variables. Los resultados mostraron que el uso de sistemas de conversión eficientes y controladores avanzados podría aumentar la producción de energía en un 20% en comparación con los sistemas convencionales. Este estudio ofrece importantes estrategias para la implementación de sistemas fotovoltaicos en regiones con climas impredecibles, asegurando la eficiencia a largo plazo.

En términos generales, la tecnología fotovoltaica ha avanzado considerablemente en eficiencia y aplicabilidad. El uso de materiales innovadores, junto con la integración de sistemas de seguimiento solar, ha permitido mejorar la conversión de energía solar, lo que

favorece su implementación en diversas regiones. Aunque persisten desafíos económicos y tecnológicos, la energía fotovoltaica sigue siendo una opción apreciada para la sostenibilidad energética en zonas con alta radiación solar. Además, tiene el potencial de promover el desarrollo económico y social en comunidades rurales, facilitando el acceso a una fuente de energía limpia y renovable que puede transformar la calidad de vida de sus habitantes.

## **4.2.2 A nivel Nacional**

### **4.2.2.1 Biomasa**

El aprovechamiento energético de residuos biomásicos en Colombia ha sido objeto de numerosos estudios en diferentes zonas del país, considerando las fuentes específicas disponibles para producir energía; por ejemplo, en el trabajo llevado a cabo por Gutiérrez et al. (5) durante el año 2020, se analizaron residuos provenientes de actividades agrícolas, agroindustriales, ganaderas y mataderos. Específicamente, los resultados mostraron que residuos agrícolas, como la paja de arroz y los desechos de la caña de azúcar, podrían generar hasta 6.2 TWh al año; dicha cantidad corresponde alrededor del 10% del consumo nacional de electricidad, lo que resalta su utilidad práctica para satisfacer demandas locales. Este tipo de biomasa, utilizada mediante combustión directa o procesos como la digestión anaerobia, representa una opción viable para producir energía de manera autónoma en áreas rurales; esta opción resulta especialmente interesante para fincas tecnificadas, como Villa Mercedes, lugar de estudio en esta tesis.

Por otro lado, en cuanto a la producción de biogás, Rocha et al. (117) analizaron la viabilidad de este proceso utilizando residuos orgánicos generados en diferentes sectores, incluido el sector agrícola en Colombia. Según los autores, los residuos agrícolas y de la ganadería, como el estiércol de cerdo, tienen un potencial de producción de biogás de aproximadamente 7,5 m<sup>3</sup> por tonelada de residuo. Esto se traduce en la posibilidad de generar hasta 0,21 kWh por cada metro cúbico de biogás producido, lo que constituye una alternativa energética interesante para sistemas autónomos de generación en fincas de pequeña escala.

En esta dirección, Tavera et al. (118) hicieron un estudio relacionado con la digestión anaeróbica de residuos en Colombia, con énfasis en el sector ganadero; observaron que el procesamiento del estiércol bovino bajo condiciones apropiadas podría alcanzar una producción cercana a 60 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de residuo, suficiente para cubrir necesidades energéticas mediante sistemas autónomos en zonas rurales. Aunque existen ciertos retos tecnológicos y económicos, se considera que implementar estos sistemas ayudaría a resolver problemas energéticos en lugares donde predomina la actividad ganadera.

Por otra parte, Contreras et al. (119) abordaron el tema del biogás desde una perspectiva parecida, concentrándose en aprovechar los residuos orgánicos generados en entornos agrícolas y pecuarios en Colombia; este grupo indicó que, por cada tonelada de residuos, la producción podría rondar los 8,4 m<sup>3</sup> de biogás, lo cual representa un ahorro energético considerable. Sin embargo, señalaron dificultades prácticas para extender estos sistemas; algunos ejemplos son la escasa infraestructura local y los altos costos iniciales para instalar los digestores, especialmente en fincas pequeñas.

En otro estudio orientado a las energías renovables, Hernández et al. (6) examinaron el uso de biodigestores específicamente en fincas cafeteras ubicadas en la región del eje cafetero colombiano; estos investigadores determinaron que el estiércol resultante del cultivo del café puede generar de 0,15 a 0,25 m<sup>3</sup> de biogás por kilogramo de residuo procesado. Aunque este residuo es menos abundante comparado con otros tipos, aprovecharlo mediante sistemas adaptados podría satisfacer parcialmente las demandas energéticas básicas de las fincas, sobre todo aquellas relacionadas con el secado del café.

Finalmente, en relación con la eficacia energética de los biodigestores, Presta et al. (120) examinaron la influencia de energías renovables en contextos rurales, centrándose particularmente en fincas cafeteras colombianas que utilizan biogás; su estudio permitió concluir que estos sistemas podrían cubrir entre 30% y 50% de los requerimientos

energéticos totales en una finca promedio. La investigación subrayó también la necesidad de integrar distintos tipos de tecnologías renovables, por ejemplo, combinando sistemas solares con el biogás, buscando optimizar así la producción autónoma de energía en áreas rurales.

La producción de biogás a partir de estiércol de cerdo también ha sido evaluada en Colombia en diversos estudios, Mosquera et al. (121) examinaron la viabilidad de un sistema UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) en fincas de producción porcina. En su estudio, se encontró que la digestión de estiércol de cerdo podría generar entre 5 y 10 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de residuo, lo que equivaldría a una producción de 0,15 kWh por metro cúbico de biogás. Estos resultados podrían ser de gran utilidad para la dimensión de un sistema de autogeneración en fincas que integren la ganadería como parte de su actividad económica.

Por último, el análisis sobre la digestión anaeróbica y la fermentación oscura en residuos orgánicos realizado por Amado et al. (122) proporciona información útil acerca del uso energético de la biomasa residual en el contexto colombiano; dicho estudio indicó que la digestión anaeróbica de residuos agrícolas y pecuarios puede producir hasta 0,25 m<sup>3</sup> de biogás por kilogramo tratado, mientras que la fermentación oscura bajo condiciones controladas generó energía complementaria, aumentando así la eficiencia general de estos sistemas energéticos en entornos rurales.

En este orden de ideas, investigaciones previas en Colombia confirman que los residuos agrícolas y pecuarios tienen un potencial considerable para su aprovechamiento en sistemas locales de autogeneración energética; sin embargo, permanecen algunos retos relacionados con los costos asociados, disponibilidad de infraestructura adecuada y necesidades específicas de formación técnica, aspectos que serán tratados en esta investigación mediante la evaluación de un sistema de autogeneración basado en biomasa

implementado en la finca Villa Mercedes, considerando siempre las particularidades del contexto local.

#### **4.2.2.2 Energía Solar Fotovoltaica**

En el ámbito nacional, Eras et al. (123) exploraron cómo funcionan los sistemas fotovoltaicos autónomos en zonas no interconectadas de Colombia; estos autores señalaron que su instalación facilitó un acceso más estable y limpio a la energía, algo esencial para el progreso de comunidades rurales. En términos económicos, quedó claro que, a largo plazo, los sistemas solares resultaron una alternativa más económica comparada con otras fuentes convencionales, haciendo que esta tecnología se ajuste perfectamente a lugares donde la conexión eléctrica tradicional es limitada, apoyando la sostenibilidad y mejorando las condiciones de vida; por eso, destacaron la importancia de adaptar estos sistemas a las particularidades de cada región.

Por otro lado, Soomar et al. (4) los retos y soluciones prácticas relacionadas con la optimización de la energía solar en el contexto colombiano; en su estudio hicieron énfasis en mejorar los sistemas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) y en perfeccionar la tecnología de los paneles solares para lograr una mayor eficiencia. Según sus hallazgos, mejorar estos sistemas podría incrementar hasta un 25% la producción energética, beneficiando especialmente a las áreas rurales con una demanda creciente; en ese sentido, insistieron en seguir investigando para superar barreras tecnológicas y facilitar así la adopción generalizada de esta fuente energética.

En otro estudio, Ramírez et al. (124) observaron cómo afectan social y económicamente los proyectos solares autónomos a viviendas rurales colombianas; encontraron que dichos proyectos facilitaron considerablemente el acceso energético en regiones apartadas y contribuyeron a mejorar la calidad de vida en los hogares, reduciendo costos y promoviendo la autosuficiencia energética. Asimismo, estos proyectos impulsaron el empoderamiento comunitario al otorgar a las personas un mayor control sobre sus fuentes

energéticas; así pues, sugirieron adaptar cuidadosamente los proyectos a las necesidades específicas sociales y económicas de cada comunidad para garantizar su efectividad y continuidad.

Para identificar cuáles son las fuentes energéticas más apropiadas para la región Pacífica colombiana, Rocha et al. (125) aplicaron el proceso jerárquico analítico (AHP); en su estudio consideraron variables como disponibilidad de recursos solares, costos económicos y beneficios sociales. Tras el análisis concluyeron que, debido al bajo costo operativo y su autonomía energética, la energía solar fotovoltaica resultó ser la mejor opción; por eso, recalcaron que esta tecnología puede resolver diversos problemas energéticos y socioeconómicos en comunidades rurales colombianas.

Por su parte, Pérez y Flórez (126) propusieron una metodología basada en AHP para evaluar qué tan viables son los proyectos fotovoltaicos en zonas rurales; tomaron en cuenta factores específicos como radiación solar, costos de instalación y condiciones de infraestructura local. Los resultados mostraron que, en diversas áreas rurales de Colombia, implementar estos proyectos es económicamente viable considerando los ahorros energéticos futuros; así, proporcionaron una herramienta útil para planificar y ejecutar proyectos solares, contribuyendo a superar obstáculos económicos y logísticos que suelen limitar su adopción.

Finalmente, Villamizar et al. (126) realizaron un análisis técnico y financiero de un sistema fotovoltaico instalado en una comunidad rural en Norte de Santander; su investigación concluyó que estos sistemas son viables técnica y económicamente atractivos a largo plazo, mostrando un retorno de inversión favorable. Asimismo, señalaron que esta tecnología puede mejorar considerablemente la calidad de vida en comunidades rurales, al ofrecer acceso a energía limpia y estable, resaltando así la necesidad de promover activamente la energía solar en aquellas zonas rurales colombianas donde la infraestructura energética convencional es escasa o inexistente.

Con base en lo anterior, la energía solar fotovoltaica representa es útil para las zonas rurales de Colombia, promoviendo el acceso a la energía y elevando la calidad de vida de las comunidades más apartadas. Los estudios destacan la viabilidad técnica y económica de estos sistemas, sobre todo en áreas que no están conectadas a la red eléctrica, al tiempo que resaltan la necesidad de mejorar tecnologías como el seguimiento del punto de máxima potencia. La adaptación de estos proyectos a las características específicas de cada región facilita su efectividad a largo plazo, impulsando el desarrollo sostenible y económico en las comunidades rurales.

## Capítulo 5

### METODOLOGÍA

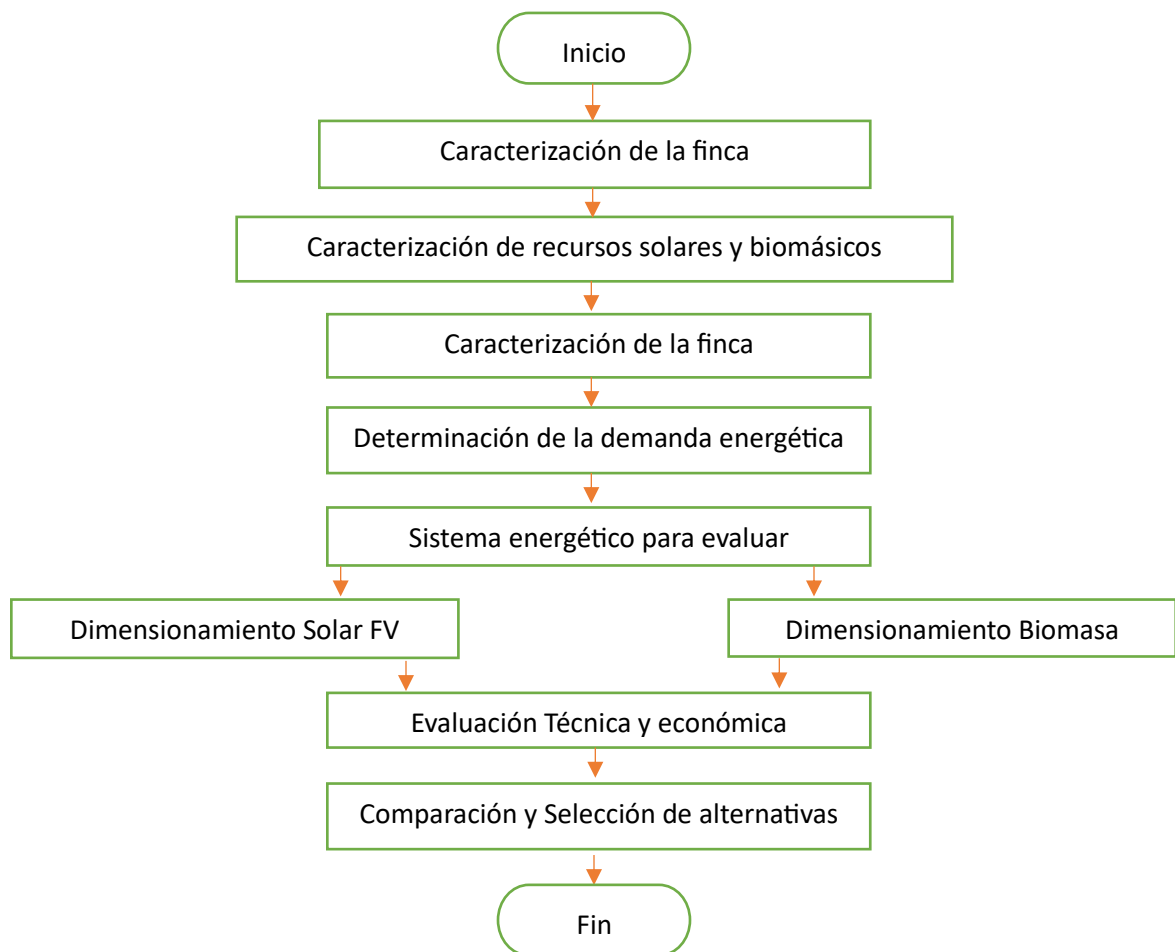
#### 5.1 Diseño Metodológico

La investigación desarrollada es de tipo aplicado, ya que lo que se busca es dar una solución a una problemática, mediante la evaluación técnica y económica de dos alternativas de autogeneración para la finca Villa Mercedes, ubicada en el municipio de Palermo (Huila).

La propuesta tiene un alcance cuantitativo, descriptivo y comparativo, ya que se realiza una caracterización de los recursos energéticos disponibles, se determina la demanda energética de finca y se comparan las dos tecnologías, una basada en energía solar fotovoltaica y la otra en biomasa.

#### 5.2 Diagrama de flujo metodológico

A continuación, se presenta el diagrama de flujo utilizado para el desarrollo de la investigación.



A continuación, se presentan las actividades desarrolladas para la obtención de los datos pertinentes y el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

### **5.3 Fase 1 - Diagnóstico y caracterización de recursos**

La Fase 1 corresponde al diagnóstico inicial del caso de estudio, en el cual se recopila información necesaria para determinar los equipos existentes y los proyectados, junto con su respectiva demanda energética. Asimismo, estimar la cantidad de recurso solar y de biomasa disponible en la finca, con el fin de contar con toda la información requerida para el análisis técnico de las alternativas propuestas.

- Realizar entrevista al Sr. Luis María Rouille, propietario de la finca Villa Mercedes.
- Realizar visita técnica de campo para recolección de información in situ.
- Realizar la caracterización geográfica, climática y productiva del municipio de Palermo (Huila).
- Determinar las especificaciones de los equipos requeridos para la tecnificación agropecuaria.
- Calcular la demanda total requerida de la Finca Villa Mercedes (actual y proyectada).
- Caracterizar el recurso solar disponible en la zona.
- Caracterizar el recurso de biomasa (estiércol bovino) disponible en la finca.

### **5.4 Fase 2 - Análisis técnico y dimensionamiento de sistemas**

La Fase 2 se establecen los supuestos técnicos y económicos que soporta los cálculos y proyecciones para el dimensionamiento técnico de los sistemas propuestos de autogeneración. Con base en la información recolectada en la fase 1, se realizaron los cálculos para determinar los equipos del sistema fotovoltaico, incluyendo su modelación en el software PVsyst. Además, se desarrollaron los cálculos necesarios para determinar el sistema de biodigestión y el motogenerador.

- Establecer supuestos técnicos y económicos para delimitar el caso de estudio
- Dimensionar un sistema de autogeneración fotovoltaico.
- Dimensionar un sistema de biodigestión anaeróbica para la producción de biogás.

- Dimensionar un motogenerador eléctrico alimentado por biogás.

A continuación, se presentan las fórmulas utilizadas en el dimensionamiento de los sistemas energéticos.

#### 5.4.1 Ecuaciones para el sistema biomasa:

##### Sólidos volátiles

$$VS_d = M_{est} \times TS \times (VS/TS)$$

Donde:

- $VS_d$ : sólidos volátiles diarios (kg/día)
- $M_{est}$ : estiércol diario (kg/día)
- $TS$ : sólidos totales
- $VS/TS$ : fracción de sólidos volátiles

#### 5.4.2 Producción de biogás

$$Q_g = VS_{deg} \times Y_{bg}$$

Donde:

- $Q_g$ : biogás producido (m<sup>3</sup>/día)
- $VS_{deg}$ : sólidos volátiles degradados
- $Y_{bg}$ : rendimiento específico de biogás

#### 5.4.3 Volumen útil del biodigestor

$$V_u = \frac{M_{mezcla} \times TRS}{\rho}$$

#### 5.4.4 Energía producida

$$E_{bg} = Q_g \times PCI$$

No se incluyen fórmulas para el dimensionamiento del sistema Fotovoltaico ya que este fue diseñado y modelado mediante PVsyst.

### **5.5 Fase 3 – Evaluación técnico – económica comparativa**

En la Fase 3 se definen los criterios técnicos y económicos para comparar las alternativas propuestas. Con base en los equipos y componentes definidos en la fase anterior, se estima el costo de la inversión (CAPEX) y el costo de operación y mantenimiento (OPEX) requerido para determinar la opción más conveniente para la Finca Villa Mercedes.

- Criterios técnicos y económicos que permiten determinar la opción más conveniente para la finca Villa Mercedes.
- Calcular los costos de la inversión (CAPEX) y operación y mantenimiento (OPEX) asociados a la tecnificación de la finca Villa Mercedes.
- Estimar los costos de la inversión (CAPEX) y operación y mantenimiento (OPEX) del sistema fotovoltaico.
- Estimar los costos de la inversión (CAPEX) y operación y mantenimiento (OPEX) del sistema de biodigestión.
- Realizar un análisis comparativo de los dos sistemas de autogeneración en términos técnicos y económicos.

## **Capítulo 6**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **6.1 Fase 1 - Diagnóstico y caracterización de recursos**

##### **6.1.1 Entrevista de entendimiento con el Sr. Luis María Rouille propietario de la finca Villa Mercedes.**

Como parte del proceso de recolección de información primaria, el día 4 de septiembre de 2024 se llevó a cabo una videoconferencia con el señor Luis María Rouille Tamayo, propietario de la finca Villa Mercedes, ubicada en el municipio de Palermo, departamento del Huila. La entrevista tuvo como propósito obtener información directa sobre las condiciones actuales del predio, los aspectos operativos del sistema productivo y la percepción del propietario frente a los desafíos del campo colombiano, particularmente en relación con la tecnificación rural.

Al inicio de la conversación, el Sr. Rouille compartió una reflexión profunda que enmarca la realidad sociocultural que enfrentan muchas UPA en Colombia. Su testimonio, cargado de experiencia y sentido crítico, ofrece una mirada valiosa sobre el envejecimiento del productor agropecuario, la falta de relevo generacional y la percepción negativa que existe sobre el campesinado y su capacidad de innovar. A continuación, se transcribe un fragmento representativo de su intervención:

“Tengo 76 años y he trabajado en el campo toda mi vida. La mayoría de los propietarios de las fincas en la zona son personas mayores de 50 años, que durante toda su vida han recopilado conocimiento acerca del campo. Son personas tradicionales y costumbristas, dedicadas a la producción de leche y carne, que es lo que saben, aprendiendo de forma empírica de sus padres. No conocen qué es la tecnificación. Ahora en esta época la mayoría de los hijos de estas personas no tienen interés en el campo. No hay un relevo generacional en ningún sentido: ni humano, ni técnico, ni tecnológico, ni productivo. Al

productor del campo lo ven como un ser menos, ignorante, atrasado. Se le menosprecia y creen que la tecnificación solo es para aquellas fincas de la alta sociedad”.

Este testimonio refleja no solo una problemática estructural en términos de acceso a tecnología, sino también una profunda brecha cultural y generacional que afecta la sostenibilidad del campo colombiano.

Durante la entrevista, el señor Rouille también proporcionó información clave para el diagnóstico técnico de la finca. Indicó que la finca Villa Mercedes está habitada por cuatro personas: el mayordomo, su esposa y sus dos hijos, quienes se encargan de las labores cotidianas. El predio se caracteriza por desarrollar actividades agropecuarias y cuenta con una infraestructura básica compuesta por una vivienda principal, un establo y una porqueriza. La casa cuenta con conexión a la red eléctrica del operador regional Electro Huila, lo cual permite el suministro básico de energía.

Este encuentro permitió no solo identificar condiciones físicas y operativas del predio, sino también comprender la dimensión humana y social que condiciona la implementación de proyectos tecnológicos en contextos rurales, lo cual resulta clave para el diseño de soluciones energéticas y productivas adaptadas a las realidades del territorio.

La finca Villa Mercedes cuenta con un hato bovino compuesto por 30 reses, destinadas principalmente a la producción de carne y leche es decir de doble propósito. A continuación, se presenta en la figura 12 los ejemplares bovinos que tiene la finca.



*Figura 13 Ejemplares bovinos de la finca*

Del total del hato, alrededor de 15 vacas se encuentran actualmente en etapa productiva de leche, con edades que oscilan entre los 3 y 8 años. Estas vacas constituyen el núcleo activo del sistema lechero de la finca, y se utiliza tanto para el consumo interno como para la venta al mercado local.

Las 15 reses restantes se encuentran en distintas etapas del proceso de crecimiento y engorde, y están destinadas a cumplir funciones estratégicas dentro del esquema de reposición de vientres. En otras palabras, estas hembras jóvenes o novillas están proyectadas para sustituir gradualmente a las vacas que, por razones de edad, salud o bajo rendimiento productivo, dejan de participar en el proceso de ordeño. Este sistema de rotación permite mantener una continuidad operativa en la producción láctea, evitando interrupciones en el flujo de ingresos y fortaleciendo la sostenibilidad del ciclo ganadero a largo plazo.

La implementación de un esquema de doble propósito con reposición planificada es un indicador positivo de manejo técnico del hato, pero requiere condiciones óptimas de alimentación, sanidad y monitoreo constante del rendimiento. En este sentido, la tecnificación de los procesos productivos como la incorporación de ordeño mecánico, control de pesaje, picado de forraje y suministro energético eficiente, se convierte en un componente

estratégico para mejorar los índices de conversión, reducir pérdidas y maximizar la productividad tanto cárnica como láctea del sistema.

Cada una de las vacas en producción genera en promedio cinco botellas de leche diarias, lo que equivale a aproximadamente 6,5 litros por animal, considerando que cada botella contiene cerca de 1,3 litros. Esta leche es comercializada de manera directa a distribuidores locales, quienes acuden a la entrada de la finca para realizar la recolección del producto, lo que reduce los costos logísticos asociados al transporte, pero también limita el margen de comercialización y el acceso a mercados más amplios o regulados.

Actualmente, se venden alrededor de 75 botellas de leche por día, a un precio unitario de \$1.500 COP. Esto genera un ingreso bruto diario de \$112.500 COP, equivalente a aproximadamente \$3.375.000 COP mensuales, siempre que se mantenga una producción estable y sin interrupciones. Este flujo de caja representa la principal fuente de ingreso líquido de la finca.

En cuanto al componente agrícola, la finca dispone actualmente del potrero 2 (ver figura 14) destinado al cultivo de maíz, la cual se utiliza como insumo para la alimentación del ganado, especialmente en la elaboración de silo; por otro, una parte de la cosecha se destina a la venta local, generando ingresos complementarios. Este cultivo se realiza tres veces al año, en ciclos ajustados a las condiciones climáticas del municipio de Palermo, aprovechando los picos de precipitación para optimizar el rendimiento por hectárea. A continuación, se presenta en la figura 14 las Hectáreas actuales y proyectadas para el cultivo de maíz.



**Figura 14** Ubicación de potreros para siembra de maíz actual y proyectado

*Elaboración Propia*

El maíz, como cultivo estratégico dentro de sistemas ganaderos, proporciona una fuente energética clave en la dieta bovina, tanto en forma de forraje verde como en ensilaje. No obstante, su aprovechamiento eficiente requiere el uso de maquinaria especializada como picadoras y empacadoras de silo.

Por tanto, la tecnificación de las labores de cultivo, recolección y procesamiento del maíz es fundamental para incrementar la autosuficiencia alimentaria del hato, reducir los costos de suplementación externa y mejorar la resiliencia productiva de la finca Villa Mercedes ante las variaciones climáticas y del mercado.

Para la cosecha del maíz, la finca recurre a la contratación temporal de mano de obra no calificada. En cada ciclo productivo, se vinculan aproximadamente ocho trabajadores, quienes se encargan de realizar el corte del cultivo de manera manual, utilizando machete. Esta práctica, aunque tradicional y de bajo costo de capital, implica una alta demanda de trabajo físico, baja eficiencia operativa y una limitada capacidad para expandir el área cultivada sin incrementar proporcionalmente los costos laborales.

Una vez cortado, el maíz se empaqueta manualmente en bolsas plásticas, sin maquinaria que facilite o acelere el proceso de recolección y conservación. Posteriormente, estas bolsas son transportadas y almacenadas en el establo, el cual actualmente cumple una doble función: como área de resguardo del ganado y como espacio de almacenamiento del forraje. A continuación, se presenta en la figura 15 las bolsas de la cosecha de maíz recogida a mano.



***Figura 15 Almacenamiento en el establo en bolsas de la cosecha de maíz recogida a mano***

El uso de herramientas manuales y la ausencia de tecnología especializada en el procesamiento del maíz, como picadoras, empacadoras o silos adecuados, reduce la eficiencia del proceso, incrementa el esfuerzo físico requerido y puede derivar en pérdidas postcosecha significativas. Asimismo, la falta de mecanización en esta etapa representa una barrera para lograr una alimentación tecnificada y estable del hato bovino, particularmente durante las temporadas secas o de escasez forrajera.

Estas condiciones reflejan una necesidad urgente de tecnificación en la cadena de producción y conservación del maíz, no solo para mejorar la eficiencia del trabajo y reducir los costos operativos, sino también para garantizar una dieta continua, balanceada y de mejor calidad para el ganado, que incida positivamente en la productividad lechera y en el bienestar animal.

La vivienda principal de la finca cuenta con suministro permanente de agua a partir de un nacimiento natural propio, el cual abastece las necesidades básicas de consumo doméstico y algunas labores agropecuarias. Este recurso hídrico, al ser de origen superficial y de flujo constante, representa una ventaja estratégica para la autosuficiencia operativa, especialmente en contextos rurales donde el acceso a acueductos convencionales es limitado o inexistente.

Adicionalmente, en los alrededores de la finca se han identificado cuatro nacimientos más y una quebrada de curso natural denominada La Urriaga, que recorre parte del terreno.

En cuanto al saneamiento básico, la finca cuenta con un pozo séptico que permite el manejo de las aguas residuales domésticas, cumpliendo una función esencial en la gestión sanitaria del predio.

La disponibilidad de fuentes hídricas naturales y la existencia de un sistema básico de gestión de aguas residuales constituyen condiciones favorables para el desarrollo de un modelo de finca tecnificada, sostenible y adaptada al contexto rural, siempre que se gestionen bajo principios de eficiencia, conservación y uso responsable de los recursos.

### **6.1.2 Realizar visita técnica de campo para recolección de información in situ**

El 14 de diciembre de 2024 se llevó a cabo una visita técnica a la finca Villa Mercedes, ubicada en la zona rural del municipio de Palermo (Huila), con el propósito de verificar in situ las condiciones generales y específicas tanto del terreno como de las edificaciones e infraestructura productiva. En la figura 16 se observa el letrero informativo de la entrada a la finca Villa Mercedes.



**Figura 16** Fotografía del letrero a la entrada de la finca Villa Mercedes

Esta actividad fue fundamental para complementar la información recopilada mediante entrevistas y establecer las bases técnicas para la evaluación de los dos sistemas de autogeneración energética a pequeña escala. Durante la jornada, se desarrollaron las siguientes acciones:

En primer lugar, se procedió a la toma de coordenadas geográficas (por motivos de confidencialidad no se indicarán las coordenadas de la finca Mercedes), tanto de la vivienda principal como de las áreas destinadas al cultivo de maíz y pasto de corte. Esta información permite ubicar con precisión los elementos clave de la finca en el territorio y es esencial para el diseño y orientación de sistemas de generación fotovoltaica. A continuación, se presenta en la figura 17 la ubicación y distribución de la infraestructura de la finca Villa Mercedes.



**Figura 17** Fotografía aérea de la casa habitacional y establo de la finca Villa Mercedes

Seguidamente, se elaboró un inventario detallado de los equipos eléctricos instalados en la vivienda, incluyendo su potencia nominal. Este listado constituye la base para determinar la demanda energética actual, aspecto crítico para dimensionar correctamente un sistema de autogeneración a pequeña escala.

**Tabla 7** Cuadro de inventario de equipos eléctricos de la casa de la finca Villa Mercedes

<b>Nombre Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Potencia Nominal (W)</b>
Bombillos establo	1	14
Bombillos cocina	2	14
Bombillos comedor	2	14
Bombillos sala	1	14
Bombillos cuarto 1	1	14
Bombillos cuarto 2	1	14
Bombillos cuarto 3	2	14
Bombillos bodega	1	14
Bombillos Corredor	2	14
Nevera	1	50
Televisor 1	1	105
Equipo de sonido	1	102
Ventilador 1	1	62
Ventilador 2	1	62
Ventilador 3	1	62
Lavadora	1	851
Motor de Afilar	1	370
<b>Subtotal</b>	<b>20</b>	<b>1.846</b>

*Fuente: Elaboración propia*

Durante la visita técnica se verificó el área disponible en la cubierta de la vivienda, la cual es de 155 m<sup>2</sup>, con dimensiones aproximadas de 16,5 metros de largo por 9,4 metros de ancho. La cubierta cuenta con dos vertientes de techo inclinadas la cual nos da una inclinación de 13,43°.

La casa de la finca Villa Mercedes está construida en ladrillo y cuenta con vigas hechas de concreto y varilla. El techo está conformado por tejas de zinc y estas están soportadas en una estructura conformada de vigas de madera. El Sistema fotovoltaico no se apoya directamente en las tejas, sino que se fijaría mediante anclajes especiales a la estructura de vigas de madera, este peso adicional se repartiría uniformemente sobre la estructura, donde las tejas permanecen como un elemento estético y de cerramiento, lo que permite una instalación estable de los módulos fotovoltaicos (127).



*Figura 18 Estructura del techo de la casa*

En cuanto al sistema eléctrico, se identificó el tablero principal de conexión de la red domiciliaria, así como la distribución interna de los circuitos, lo cual permitirá definir la estrategia de integración del sistema de autogeneración sin alterar la seguridad eléctrica del inmueble.

En la zona pecuaria, se inspeccionó el establo principal, el cual dispone actualmente de un sistema de ordeño manual (tradicional) para una vaca, así como de su propia fuente de iluminación. Las condiciones de este espacio evidencian la necesidad de mejorar los procesos mediante la incorporación de equipos de ordeño mecánico y mejores prácticas sanitarias.

Durante la visita también se identificaron y georreferenciaron posibles ubicaciones para la instalación de un sistema fotovoltaico y de un biodigestor. Se priorizaron zonas con buena exposición solar, cercanía a los puntos de consumo energético y disponibilidad de espacio para los componentes requeridos, considerando aspectos técnicos, topográficos y operativos.

Asimismo, se realizó un recorrido detallado por las parcelas de cultivo de maíz y pasto de corte, lo cual permitió identificar las condiciones del terreno, el estado actual de los cultivos, y los métodos de siembra y cosecha utilizados. Esta información es clave para proyectar mejoras en el manejo forrajero y en la planificación de insumos para el ganado.

Se observó de forma directa el proceso de ordeño diario, identificando las condiciones sanitarias, operativas y de manejo del producto, así como las prácticas actuales de recolección y disposición del estiércol bovino. Se establecieron los puntos donde actualmente se acumulan los residuos orgánicos, información relevante para el diseño del sistema de biodigestión, tanto en términos de eficiencia como de logística de recolección.

Esta visita permitió validar y complementar el diagnóstico preliminar de la finca Villa Mercedes, ofreciendo una base técnica sólida para el planteamiento de soluciones energéticas, productivas y ambientales adaptadas al contexto real del predio.

### **6.1.3 Realizar la caracterización geográfica, climática y productiva de la finca Villa Mercedes**

El municipio de Palermo, ubicado en el departamento del Huila, cuenta con una extensión territorial total de 92,28 km<sup>2</sup>, de los cuales 13,88 km<sup>2</sup> corresponden al área urbana y 78,40 km<sup>2</sup> al área rural, lo que evidencia un claro predominio del uso del suelo para actividades agropecuarias y forestales. Administrativamente, el municipio limita al norte con los municipios de Neiva y Planadas (Tolima); al sur con Yaguará y Teruel; al oriente con Rivera, Campoalegre y nuevamente con Neiva; y al occidente con Santa María y el área rural de Neiva (128).

Desde el punto de vista climático y altitudinal, el municipio de Palermo presenta dos franjas térmicas principales: una zona cálida ubicada entre los 460 y 1.200 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.), y una zona fría que se extiende entre los 1.800 y 2.500 m s. n. m. Estas franjas se distribuyen en un área total de 56.460 hectáreas, y determinan las vocaciones productivas del territorio (129).

Las temperaturas oscilan entre los 15 °C en las zonas más elevadas de las cordilleras y los 27 °C en las zonas bajas, correspondientes a los valles de los ríos Magdalena y Bache. El casco urbano presenta una temperatura promedio estable de 26 °C, propia de los pisos térmicos cálidos de la región (128).

La finca Villa Mercedes se encuentra ubicada dentro de la franja térmica cálida, específicamente a 736 metros sobre el nivel del mar, lo que le confiere condiciones agroclimáticas favorables para el desarrollo de cultivos como pastos de corte, gramíneas de pastoreo, maíz, frutales tropicales y algunas especies forestales de rápido crecimiento. Estas características sitúan a la finca en una zona apta para el modelo de producción doble propósito (carne y leche), dado que las temperaturas cálidas estables permiten una adecuada productividad forrajera durante la mayor parte del año, siempre que se cuente con un sistema eficiente de manejo del recurso hídrico.

El entorno territorial también influye en las posibilidades de comercialización y conexión con mercados. Palermo mantiene una relación directa con Neiva, capital del departamento, a través de vías de comunicación primarias y secundarias que facilitan el tránsito de productos agropecuarios.

#### **6.1.4 Especificaciones técnicas de los equipos requeridos para la tecnificación de la finca Villa Mercedes**

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas más relevantes de cada uno de los equipos requeridos para la tecnificación de los procesos productivos en la finca Villa Mercedes.

##### **6.1.4.1 Impulsor Eléctrico - Cerca Eléctrica**

La finca requiere la instalación de dos cercas eléctricas para dividir los potreros actuales existentes. La longitud total de las cercas a instalar es de aproximadamente 991,3 m para los potreros 1 y 2. El objetivo es proteger la cosecha de las vacas y/o animales silvestres que pudieran invadir y afectar la cosecha.

En la siguiente tabla se describen las especificaciones técnicas del equipo:

*Tabla 8 Especificaciones técnicas cerca eléctrica*

<b>Descripción</b>	<b>Especificación</b>
Tensión nominal	110 VAC/60 HZ
Duración de pulsos	7 ms
Tiempo entre pulsos	1,2s
Energía máxima	2,7 julios
Consumo en energía	11,3 W/h



*Figura 19 Impulsor eléctrico*

#### 6.1.4.2 Pica pasto ensiladora

La finca requiere la compra de una maquina ensiladora eléctrica para automatizar el proceso de picado y ensilado de la producción. Actualmente, la producción de maíz es de 34 toneladas cada 3 meses, es decir una producción total de 102 toneladas anuales, Para este proceso se requieren hasta 8 trabajadores durante 10 días para cortar y guardar manualmente la cosecha. Este equipo permitirá reducir significativamente esta actividad.

En la siguiente tabla se describen las especificaciones técnicas del equipo:

*Tabla 9 Especificaciones equipo (130)*

<b>Descripción</b>	<b>Especificación</b>
Marca	IDEAGRO
Referencia	PACK J – 402
Peso total aproximado	450 kilos
Capacidad de trabajo	Hasta 3 Ton/hora
Capacidad eje de transporte	1.000 kg
Sistema de freno	Disco

Material del sinfín	Acero estructural 10 Kn
Neumáticos Rin 13	Cantidad 2
Eléctrico	7 kW

---



*Figura 20* Equipo pica pasto

#### 6.1.4.3 Báscula ganadera electrónica

La finca requiere una báscula ganadera electrónica para realizar el pesaje del ganado, especialmente durante el proceso de venta de terneros y para hacer seguimiento al desarrollo y crecimiento de los animales.

En la siguiente tabla se describen las especificaciones técnicas del equipo:

*Tabla 10* Especificaciones Báscula ganadera electrónica (131)

Descripción	Especificación
Referencia	ELITE 3000
División de Escala	0,5 kg y 1 kg

Material	Barras Metálicas o Acero Inoxidable.
Capacidad Máxima	3.000 kg
Indicadores de Pesaje	Plástico ABS Solo Peso, Acero Inoxidable Solo Peso, Acero Inoxidable con Impresora.
Accesorios Opcionales	Batea Ganadera en Aluminio.



**Figura 21** Báscula ganadera Electrónica (131)

#### 6.1.4.4 Ordeño mecánico

Actualmente el ordeño es realizado por el mayordomo. Para mejorar la eficiencia y la calidad, se requiere un equipo de ordeño mecánico de 2 puestos, con capacidad de ordeñar entre 20 y 25 vacas por hora. El equipo cuenta con 1 motor eléctrico de 1.0 HP monofásico a 110 V.

En la siguiente tabla se describen las especificaciones técnicas del equipo:

**Tabla 11** Especificaciones técnicas Máquina de Ordeño carretilla (132)

Descripción	Especificación
Marca	SUPLAGRO
Bomba de vacío	400 litros/min
Potencia del motor	0,75 kW
Voltaje	110 V/ 220 V

Colector Orbic plástico  
Puestos

250 CC  
2

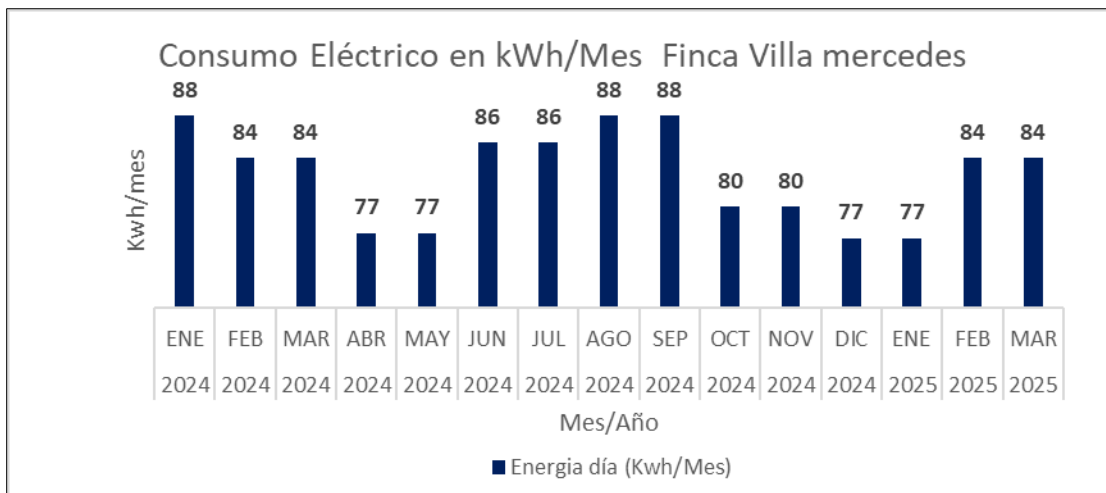


*Figura 22 Equipo – Máquina de ordeño carretilla (132)*

### 6.1.5 Calcular la demanda total requerida de la Finca Villa Mercedes (actual y proyectada)

#### 6.1.5.1 Consumo energético actual

Se realizó la revisión de los consumos mensuales históricos de la finca para el periodo comprendido entre enero de 2024 y marzo de 2025. A continuación, se observa en la figura 23 el comportamiento del consumo de energía mensual en kilovatios-hora (kWh/mes).



*Figura 23 Registro de consumo mensual de energía eléctrica (kWh).*

### *Elaboración propia*

Durante el año 2024, el consumo osciló entre un máximo de 88 kWh/mes (en enero, agosto y septiembre) y un mínimo de 77 kWh/mes (en abril, mayo y diciembre), con una ligera recuperación en los meses de junio y julio (86 kWh/mes). Esta variabilidad puede estar relacionada con cambios estacionales, uso intermitente de algunos equipos eléctricos o variaciones en la ocupación y demanda operativa del predio.

En los primeros tres meses de 2025, se evidencia una estabilización del consumo en 84 kWh/mes (febrero y marzo), lo que podría indicar una mayor regularidad en el patrón de uso de los equipos eléctricos. Sin embargo, persisten los valores mínimos de 77 kWh en diciembre de 2024 y enero de 2025, lo cual puede estar asociado a una menor actividad agropecuaria o a restricciones en el uso de energía durante periodos no productivos.

Para corroborar la demanda de energía de la finca, se realizó el inventario de equipos eléctricos existentes y se determinó la energía requerida por cada uno y su consumo mensual. Los resultados se presentan en el siguiente cuadro de cargas actuales de la casa.

**Tabla 12** Cuadro de Cargas actual de la casa de la finca Villa Mercedes

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Potencia(W)</b>	<b>Energía (Wh/día)</b>	<b>Energía (Wh/Mes)</b>
Nevera	1	50	1.200	36.000
Ventiladores	3	62	750	22.500
Bombillos	13	14	701	14.338
Lavadora	1	851	2.082	8.328
Televisor	1	105	315	6.300
Equipo de sonido	1	102	102	510
Motor de Afilar	1	370	31	62
Subtotal	21	1.554	5.181	88.038

*Fuente: Elaboración propia*

### 6.1.5.2 Consumo energético proyectado

La demanda energética proyectada de la finca Villa Mercedes muestra un consumo adicional estimado de 5.032 Wh/día (150.969 Wh/mes). Este aumento se debe principalmente a la incorporación de nuevos equipos eléctricos esenciales para la tecnificación de la finca, como se detallan en la tabla abajo.

*Tabla 13 Cuadro de Cargas proyectadas adicionales de la finca Villa Mercedes*

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Potencia (W)</b>	<b>Energía (Wh/día)</b>	<b>Energía (Wh/Mes)</b>
Ordeño mecánico	1	750	2.250	67.500
Impulsor eléctrico + Cerca	1	11	271	8.136
Bascula electrónica	1	50	100	3.000
Máquina ensiladora	1	7.000	2.411	72.333
Subtotal	4	7.811	5.032	150.969

*Fuente: Elaboración propia*

Dentro del proceso de tecnificación proyectado para la finca Villa Mercedes, se identificaron nuevos equipos eléctricos destinados a optimizar la eficiencia y productividad del sistema agropecuario. El análisis del consumo energético proyectado revela que el equipo con mayor demanda es la máquina ensiladora, cuyo consumo proyectado es de 72.333 Wh/mes, correspondiente al 48% del consumo energético total proyectado.

En segundo lugar, se encuentra la máquina de ordeño mecánico, cuyo consumo proyectado es de 67.500 Wh/mes, correspondiente al 45% del consumo energético total proyectado.

El balance total energético de la finca, considerando tanto los consumos actuales como los proyectados, se muestra en la tabla 14.

**Tabla 14** Cuadro de Cargas totales de la finca Villa Mercedes

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad Equipos</b>	<b>Potencia Pico (W)</b>	<b>Energía (Wh/día)</b>	<b>Energía (Wh/Mes)</b>
Total, Carga Villa Mercedes	24	9.365	10.213	239.007

*Fuente: Elaboración propia*

### **6.1.6 Caracterizar el recurso solar disponible en la zona**

Con el objetivo de evaluar la viabilidad de un sistema de generación fotovoltaico en la finca Villa Mercedes, se llevó a cabo un análisis detallado del recurso solar disponible en la región, tomando como referencia su ubicación geográfica específica. La finca está situada en el municipio de Palermo, departamento del Huila, Colombia.

Para caracterizar el potencial solar del sitio, se recurrió al uso de bases de datos climáticas especializadas y de herramientas reconocidas a nivel internacional, con el fin de garantizar la precisión y confiabilidad de los datos. La fuente principal de información utilizada fue el software Meteonorm versión 8.1, desarrollado por Meteotest, una entidad con sede en Suiza que integra datos provenientes de más de 8.325 estaciones meteorológicas distribuidas globalmente, además de modelos satelitales (95).

La capacidad de Meteonorm para combinar mediciones in situ con interpolaciones espaciales (96) y datos satelitales facilita una estimación precisa del recurso solar en sitios específicos, incluso en zonas rurales con escasa densidad de estaciones meteorológicas.

Para la finca Villa Mercedes, esta herramienta fue empleada para obtener valores medios de irradiación solar diaria en superficie horizontal, expresados en kilovatios-hora por metro cuadrado por día (kWh/m<sup>2</sup>/día), correspondientes al recurso GHI (Global Horizontal Irradiance). La GHI es un parámetro fundamental para estimar el rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos y constituye la base para el dimensionamiento del sistema

propuesto. Los resultados de meteo mensuales tales como irradiación global diaria, irradiación difusa horizontal, temperatura, velocidad del viento, turbidez y humedad relativa se presentan a continuación en la figura 24.

	Irradiación horizontal global kWh/m²/mes	Irradiación difusa horizontal kWh/m²/mes	Temperatura °C	Velocidad del viento m/s	Turbidez Linke L	Humedad relativa %
Enero	179.6	58.7	23.9	1.35	3.488	76.0
Febrero	156.3	61.9	24.2	1.39	3.882	76.2
Marzo	170.3	74.2	24.2	1.39	3.449	76.5
Abril	170.8	79.3	23.4	1.38	3.384	81.1
Mayo	183.1	88.6	23.8	1.48	3.138	79.4
Junio	173.3	86.7	23.6	2.08	3.227	78.8
Julio	173.8	86.4	24.2	2.38	3.175	88.4
Agosto	181.5	74.6	24.4	2.76	3.414	83.2
Septiembre	153.4	77.7	23.8	2.09	3.440	88.7
Octubre	156.7	77.1	23.6	1.98	3.378	78.7
Noviembre	181.7	86.4	23.0	1.39	3.427	84.3
Diciembre	181.4	88.9	23.6	1.39	3.384	79.7
Año	2019.9	819.6	23.8	1.7	3.399	79.7

Irradiación horizontal global variabilidad año a año: 6.6%

**Figura 24** GHI Finca Villa Mercedes.

*Elaboración propia*

Los resultados obtenidos a partir del análisis con la herramienta Meteonorm indican que la finca Villa Mercedes presenta una irradiación horizontal global promedio anual (Global Horizontal Irradiance – GHI) de 168,325 kWh/m<sup>2</sup>/mes, lo cual equivale a una media diaria de 5,45 kWh/m<sup>2</sup>/día.

El mes con el valor más bajo de irradiancia corresponde a septiembre, con un registro de 153,4 kWh/m<sup>2</sup>/mes, lo que equivale a aproximadamente 5,11 horas pico de sol por día (HSP/día). Esta unidad —horas pico solar— representa el número de horas al día en que la irradiación solar alcanza una intensidad de 1.000 W/m<sup>2</sup> y se utiliza comúnmente como referencia técnica en el diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos.

El hecho de que el mes con menor irradiación aún mantenga un valor superior a 5 HSP/día confirma la alta disponibilidad del recurso solar en la zona y respalda técnicamente la viabilidad de un sistema fotovoltaico con alta eficiencia operativa durante todo el año. Esta continuidad en la disponibilidad energética, incluso durante los periodos de menor irradiancia, garantiza un suministro estable y predecible, lo que resulta especialmente importante para procesos agropecuarios que requieren energía constante, como el ordeño mecánico, la conservación de forrajes o la iluminación de establos.

En conjunto, estos datos permiten concluir que la finca Villa Mercedes se encuentra ubicada en una región con un excelente potencial solar, lo cual favorece tanto el rendimiento del sistema fotovoltaico proyectado como la sostenibilidad energética del modelo de finca tecnificada autosuficiente propuesto en este estudio.

A continuación, en la tabla 15 se presenta la distribución horaria promedio del recurso solar disponible en la finca Villa Mercedes en el lugar de instalación de los paneles solares.

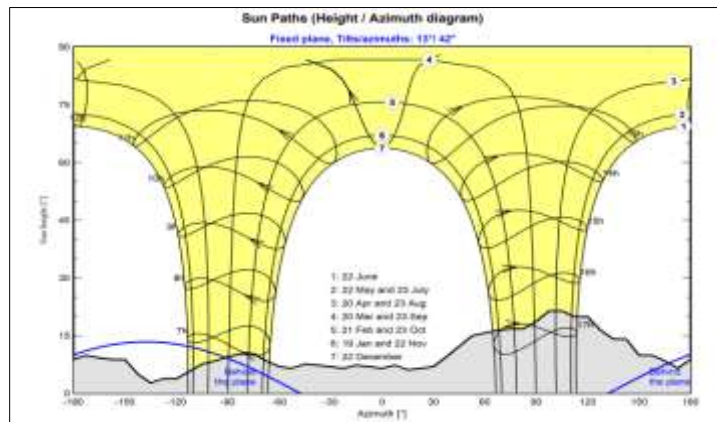
**Tabla 15** *GHI horario lugar paneles solares*

<b>Hora</b>	<b>Meteonorm (W/m<sup>2</sup>)</b>
0:00	0
1:00	0
2:00	0
3:00	0
4:00	0
5:00	0
6:00	9,5
7:00	115,6
8:00	203,3
9:00	377,1
10:00	342,5

11:00	361,3
12:00	345,5
13:00	276
14:00	176,7
15:00	57,2
16:00	27,6
17:00	20,5
18:00	0
19:00	0
20:00	0
21:00	0
22:00	0

Fuente: Elaboración propia PVsyst

A continuación, en la figura 24 vemos la trayectoria del sol en distintas fechas del año desde a ubicación de la finca, con sus respectivas sombras durante el año.



*Figura 25 Trayectoria del sol Finca Villa Mercedes.*

*Elaboración propia PVsyst*

### 6.1.7 Caracterizar el recurso de biomasa (estiércol bovino) disponible en la finca

### 6.1.7.1 Diagnóstico de la disponibilidad de biomasa

La finca Villa Mercedes, ubicada en el municipio de Palermo, Huila, cuenta con una unidad de producción bovina conformada por 30 animales de las razas Jersey y Normando, de las cuales 15 están en producción, reconocidas por su doble propósito: producción de leche y carne. Esta población ganadera genera una cantidad significativa de estiércol fresco diariamente, lo que representa un recurso estratégico para la producción de biogás mediante digestión anaerobia. Esta tecnología permite valorizar residuos orgánicos y transformarlos en energía útil y biofertilizantes, en un esquema de sostenibilidad y aprovechamiento de recursos disponibles en el entorno rural (28), (40).



*Figura 26 Estiércol fresco bovino*

La estimación de estiércol disponible se realizó con base en el peso promedio de cada raza, su producción diaria esperada y el porcentaje de recolección efectiva dentro del establo. En la Tabla 16 se presenta el inventario bovino y la cantidad de estiércol recolectable por día. Se asumió un valor conservador del 20% de recuperación del total producido, considerando pérdidas por manejo a campo abierto, prácticas de limpieza y dispersión del material orgánico (133).

*Tabla 16 Estiércol promedio disponible en la finca Villa Mercedes*

Razas de ganado bovino	Cantidad (Und)	Peso promedio (Kg)	Peso Total (Kg)	Producción estiércol por vaca (kg/día)	producción estiércol total (kg/día)	% volumen disponible en establo	Volumen disponible final (Kg/día)
Jersey	10	450	4.500	35	350	20%	70
Normando	5	530	2.650	38	190	20%	38
Subtotal	15	980	7.150	73	540	-	108

*Nota:* Elaboración propia

### 6.1.7.2 Composición próxima del estiércol bovino

La composición del estiércol bovino es fundamental para valorar su viabilidad como recurso de partida para la producción de biogás. Varios estudios han expuesto valores diferentes para los componentes que conforman el estiércol, dependiendo de distintas causas como pueden ser la raza del ganado, el tipo de manejo llevado a cabo en la finca, la época de año y las condiciones ambientales. En la tabla 17 y 18 se indican los valores de la composición próxima y análisis elemental del estiércol bovino.

**Tabla 17** Composición próxima del estiércol bovino

Parámetro	Fajobi et al. (133)	Maj (134)	Marín et al. (135)
Humedad (% bh)	85.82	74.30	74.35
Materia volátil (% bs)	60.75	-	66.77
Cenizas (% bs)	5.60	-	-
Carbono fijo (% bs)	22.67	-	15.18

*Nota:* Los valores están expresados en base húmeda (bh) o base seca (bs), según lo reportado por cada fuente.

La humedad del estiércol varía entre 74.30% y 85.82%, lo que indica que una gran parte de su peso está compuesto por agua. En cuanto a la materia volátil de la porción sólida, el rango es de 60.75% a 66.77%, reflejando la cantidad de material orgánico que puede

descomponerse, lo cual es relevante para la generación de biogás. El contenido de cenizas es de 5.60% según Fajobi et al. (133), mientras que el carbono fijo tiene un rango de 15.18% a 22.67%, indicando la cantidad de material que no se descompone fácilmente y que contribuye a la estabilidad del proceso de biodigestión (133), (134), (135).

**Tabla 18** *Análisis elemental del estiércol bovino*

<b>Parámetro</b>	<b>Fajobi et al. (133)</b>	<b>Maj (134)</b>	<b>Marín et al. (135)</b>
Carbono (C) %	43,08	35,42	39,53
Hidrógeno (H) %	7,87	4,90	5,54
Nitrógeno total %	1,53	1,51	2,25
Azufre (S) %	0,46	0,78	0,68
Oxígeno (O) %	47,06	49,48	52,00
Relación C/N	28,16	23,45	17,56

*Nota:* Los valores están expresados en porcentaje (%), según lo reportado por cada fuente.

El análisis elemental (tabla 18) muestra que el estiércol bovino está compuesto principalmente por carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O), elementos esenciales que constituyen los carbohidratos, lípidos y proteínas presentes en los residuos orgánicos (28). El contenido de nitrógeno total en el estiércol varía entre 1,53% y 2,25%, lo que favorece el proceso de digestión anaeróbica, ya que el nitrógeno es un factor decisivo para la producción de biogás. Además, el azufre (S) se encuentra en menores cantidades, con valores entre 0,46% y 0,78%, lo cual también puede influir en la eficiencia del proceso de biodigestión y la calidad del biogás generado. Por último, la relación C/N varía entre 17,56 y 28,16, valor que se encuentra dentro del rango óptimo; una relación equilibrada entre carbono y nitrógeno favorece la producción de metano durante el proceso de generación de biogás (29).

### **6.1.7.3 Proceso de biodigestión anaeróbica**

- **Carga diaria total de mezcla**

La Finca Villa Mercedes, localizada en el municipio de Palermo, Huila, cuenta con 108 kg/día de estiércol que producen sus 15 cabezas de ganado bovino de las razas Jersey y Normando durante el tiempo que permanecen en el establo. Este estiércol se usará como recurso principal para la producción de biogás a través de la digestión anaeróbica. Esta tecnología permitirá aprovechar los residuos orgánicos generados en la granja y convertirlos en bioenergía y biofertilizantes, en beneficio de la sostenibilidad del sistema agropecuario (28), (40).

Según los resultados de Jeppu et al. (136), la proporción de dilución más eficiente para la producción de biogás es 1:3 (estiércol: agua), que produce un 30% más de biogás en comparación con la relación 1:1, en condiciones de temperatura ambiente. Utilizando esta proporción, la carga diaria total de mezcla CTM (estiércol + agua) se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Carga diaria (kg/día)} = \text{Estiércol disponible (kg/día)} \times (1 + \text{Proporción dilución})$$

$$\text{Carga diaria } \left( \frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) = \frac{108 \text{ kg}}{\text{día}} \times (1 + 3) = 108 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 4 = 432 \text{ kg/día}$$

- **Volumen del biodigestor**

En la finca Villa Mercedes, con una carga diaria de mezcla de 432 kg/día (estiércol y agua), es necesario calcular el volumen adecuado para el biodigestor que permita mantener un Tiempo de Retención del Sustrato (TRS) adecuado para la digestión anaeróbica.

*Tabla 19 Tiempo de retención en función de la temperatura por región*

<b>Región característica</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo de retención (días)</b>
Trópico	30	20
Valle	20	30

Altiplano	10	60
-----------	----	----

*Nota: Adaptado de (52)*

El TRS recomendado para este tipo de biodigestores en zonas rurales es de 20 días, un valor comúnmente utilizado para la producción eficiente de biogás. Sin embargo, el TRS varía en función de la temperatura ambiente, como se observa en la Tabla 19, la cual muestra cómo el TRS se ajusta dependiendo de las condiciones térmicas de cada región.

En el caso de la finca Villa Mercedes, ubicada en una región tropical con temperaturas promedio entre 25°C y 27°C, el TRS adecuado es de 20 días, como se observa para la región tropical en la tabla 15. Esto asegura una digestión eficiente de los residuos orgánicos y una producción continua de biogás. Para calcular la densidad de la mezcla de estiércol y agua con la relación de dilución 1:3, utilizamos la fórmula de la media ponderada de las densidades de ambos componentes (estiércol y agua).

$$\text{Densidad de la mezcla (Dm)} = \frac{(\text{Destiércol} + \text{Vestiércol})(\text{Dagua} \times \text{Vagua})}{\text{Vestiércol} + \text{Vagua}}$$

- Destiércol es la densidad del estiércol: 1.1kg/litro
- Vestiércol es el volumen del estiércol: 1 parte
- Dagua es la densidad del agua: 1.0 kg/litro
- Vagua es el volumen del agua: 3 partes

Sustituyendo en la fórmula:

$$Dm = \frac{(1,1 \text{ kg/litro} \times 1) + (1,0 \text{ kg/litro} \times 3)}{1 + 3} = \frac{4,1}{4} = 1,025 \text{ kg/litro}$$

Por lo tanto, la densidad de la mezcla de estiércol y agua con la relación 1:3 es 1,025 kg/litro.

- **Sólidos totales y sólidos volátiles**

La humedad promedio del estiércol bovino en la finca Villa Mercedes se calculó tomando en cuenta los valores presentados en la Tabla 16, obteniendo un valor de 78,16%. Esta cifra indica que una gran parte del peso del estiércol está constituido por agua, lo cual es un factor determinante en la eficiencia de los procesos de digestión anaeróbica. Con base en este dato, se calculó que la materia volátil promedio es de 63,76% de la materia sólida total, lo que representa el porcentaje de material orgánico presente que es susceptible a descomposición en el biodigestor, favoreciendo la producción de biogás. Para determinar los sólidos totales (TS), es necesario restar el porcentaje de humedad de 100%, lo que da un valor de 21,84%.

Este valor es un indicativo del contenido de materia seca en el estiércol, el cual es importante para estimar el potencial de biogás generado por el material orgánico. El contenido de sólidos totales (TS) en 108 kg/día de estiércol se calcula como:

$$\text{TS del Estiércol} \left( \frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) = 108 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 0,2184 = 23,57 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Este valor (23,57 kg/día) refleja la cantidad de materia seca presente en el estiércol. En el proceso de digestión anaeróbica, la dilución del estiércol con agua influye directamente en la eficiencia de la producción de biogás.

Los sólidos volátiles (VS), que constituyen la fracción de materia orgánica que se descompone en el biodigestor, corresponden al 63,76% de los sólidos totales en el estiércol bovino, según los datos de la Tabla 16. Para calcular la carga de sólidos volátiles (VS) en la mezcla total, se utiliza el siguiente cálculo.

$$\text{VS de la Mezcla} \left( \frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) = 23,57 \text{kg/día} \times 0,637 = 15,01 \text{kg/día}$$

De acuerdo con las investigaciones previas sobre digestión anaeróbica (26), el contenido de sólidos volátiles es un indicador para estimar la cantidad de biogás que se puede generar a partir del estiércol. A mayor contenido de sólidos volátiles, mayor es la capacidad de producción de metano (CH<sub>4</sub>) en el proceso de biodigestión. En la finca Villa Mercedes, la carga de sólidos volátiles (VS) de 15,01 kg/día es adecuada para alimentar el biodigestor y maximizar la producción de biogás.

- **Masa Degradada y Producción de Biogás**

De acuerdo con la literatura técnica, se estima que aproximadamente el 50 % de los sólidos volátiles introducidos son biodegradados en el proceso anaeróbico (33)(55). Bajo este porcentaje, se calcula la masa degradada diaria:

$$\text{Masa degradada } \left( \frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) = \text{mSVT } \left( \frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) \times 50 \%$$

$$\text{Masa degradada (kg/día)} = 15 \times 0,50 = 7,2 \text{ kg/día}$$

Esto significa que aproximadamente 7,2 kg/día de sólidos volátiles son degradados en el proceso de biodigestión.

- **Estimación de la producción de biogás**

La producción diaria de biogás (Qg) se calcula multiplicando la cantidad de sólidos volátiles degradados a biogas por la finca (7,2 kg/día) por la producción específica de biogás. Esto se realiza con la fórmula siguiente:

$$Qg = Qe \times VS = 0,226 \text{ m}^3/\text{kg VS} \times 7,2 \text{ kg VS/día} = 1,6 \text{ m}^3/\text{día}$$

Para convertir m<sup>3</sup> a litros, se multiplica el resultado por 1000:

$$\text{Producción de Biogás } \left( \frac{\text{L}}{\text{día}} \right) = 1,6 * 1000 = 1.600 \text{ L/día}$$

Según los cálculos realizados con la fórmula empírica de Jeppu et al. (133), la finca Villa Mercedes tendrá la capacidad de generar 1600 litros de biogás al día utilizando los residuos orgánicos generados por su ganado bovino.

- **Estimación de la producción de biol y biodigestato**

El biol se estima como la diferencia entre la carga diaria total introducida al sistema y la masa degradada para la producción de biogás. El material no degradado y el agua permanecen como efluente líquido (biol). Usamos la siguiente fórmula para calcular el biol producido:

$$\text{Masa no degradada} \left( \frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) = m_{\text{total}} (\text{Estiercol} + \text{H}_2\text{O}) - m_{\text{SVT}} (\text{kg/día})$$

$$\text{Masa no degradada} \left( \frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) = 432 \left( \frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) - 7,2 \left( \frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) = 424,8 \left( \frac{\text{kg}}{\text{día}} \right)$$

Para estimar el caudal del efluente (biol + biodigestato) se adopta la misma densidad de la mezcla de entrada estiércol: agua (1:3) definida en el documento,  $\rho = 1,025 \text{ kg/L}$ , porque la digestión anaerobia no modifica de forma apreciable la densidad global del lodo, el contenido de sólidos permanece bajo y el medio es mayoritariamente acuoso, y así se mantiene la coherencia del balance de masa. Con esta densidad, el flujo volumétrico se calcula por:

$$Q_{\text{biol+biodigestato}} = \frac{m (\text{biol} + \text{biodigestato})}{\rho_{\text{mezcla}}} = \frac{424,8 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{1,025 \text{ kg/L}} = 414,43 \frac{\text{L}}{\text{día}} \\ \cong 0,41 \text{ m}^3/\text{día}$$

## 6.2 Fase 2 - Análisis técnico y dimensionamiento de sistemas

### 6.2.1 Supuestos técnicos y económicos

Para desarrollar el análisis de los sistemas propuestos, basamos el estudio en una serie de supuestos técnicos y económicos con el objetivo de delimitar el caso de estudio.

Entre los aspectos técnicos y económicos tenemos:

- La irradiación solar global se determinó con el software PVsyst
- La producción de estiércol es constante.
- Los sistemas son evaluados bajo configuración conectada a red (on-grid)
- Los equipos de los sistemas propuestos operan en condiciones normales.
- No se incluye fallas críticas en los equipos de forma prolongada
- El mantenimiento básico del sistema fotovoltaico como las inspecciones visuales y de limpieza serán realizados por el mayordomo de la finca Villa Mercedes.
- Los costos de inversión se mantienen según cotización de proveedores.
- La tasa de descuento es fija.
- El precio de la energía no cambia drásticamente.
- No se incluyen subsidios ni incentivos adicionales.

### 6.2.2 Dimensionar un sistema de autogeneración fotovoltaico

Una vez caracterizado el recurso solar (GHI promedio diario de 5,11 HSP), y determinado el consumo de energía (Wh/mes) actual y proyectado de la finca Villa Mercedes, se procederá en los próximos apartados a dimensionar el Sistema de Autogeneración Fotovoltaico en la Herramienta PVsyst.

A continuación, vemos la ubicación del techo de la casa de la Finca Villa Mercedes para la instalación de los paneles solares.

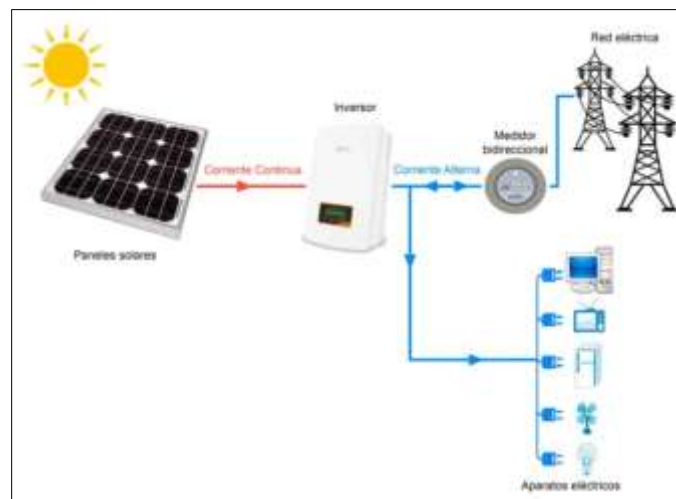


*Figura 27 Ubicación del techo de la casa finca Villa Mercedes*



*Figura 28 Área del techo de la casa finca Villa Mercedes*

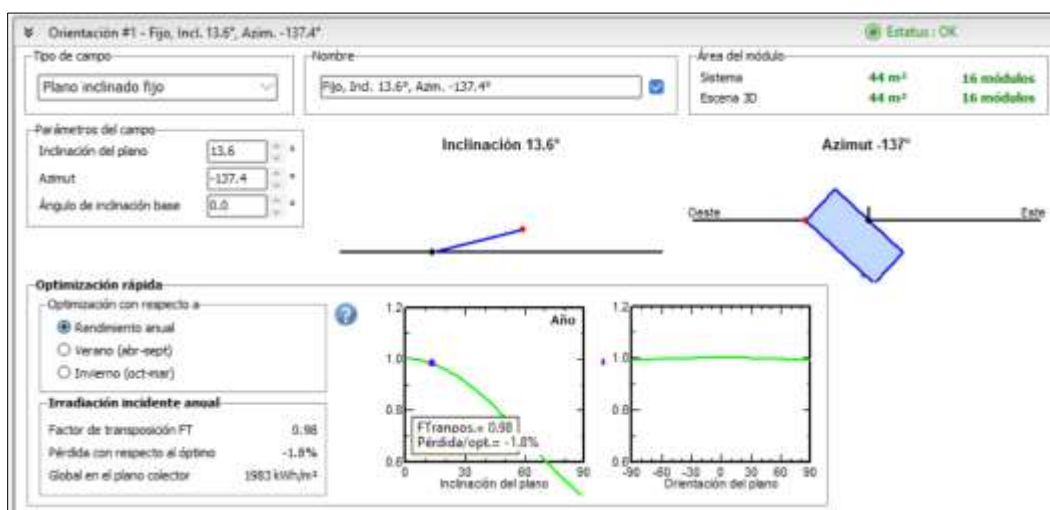
Antes de iniciar el diseño en el sistema PVSYSY, se propone la implementación de un sistema On-grid, de manera que opere de forma complementaria a la red de Electrohuila. Durante las horas pico de radiación solar, el sistema fotovoltaico alimentará los equipos eléctricos de la finca y cuando la generación del sistema sea mayor al consumo de la casa, esta energía será inyectada a la red eléctrica como excedentes. En las noches o en horas de baja radiación solar los equipos serán alimentados por la red eléctrica. Este sistema propuesto no incluye baterías por lo cual reduce de manera significativa el CAPEX del proyecto. A continuación, en la figura 29 vemos el esquema de conexión propuesto.



*Figura 29 Esquema de instalación sistema conectado a la red*

Se procedió a realizar el diseño de un sistema fotovoltaico conectado a la red mediante el software PVSystem.

A continuación, se realiza la configuración de la orientación de los paneles solares sobre el plano.



*Figura 30 Orientación del techo casa finca Villa Mercedes*

*Elaboración propia PVsystem*

Para la simulación en PVsystem se seleccionaron los módulos fotovoltaicos de la marca JINKO SOLAR, referencia JKM585M-7RL4-V. A continuación, se presentan las principales características del panel utilizado.

*Tabla 20 Características principales módulos fotovoltaicos*

Descripción	Valores	Unidad
Potencia máxima	585	W
Voltaje máximo	44,42	Vdc

Corriente máxima	13,17	Ade
Voltaje de corto circuito	53,65	Vdc
Corriente de corto circuito	13,85	Ade
Dimensiones	2,411 x 1,134	m
Peso	31,1	kg
Eficiencia del modulo	21,40%	%

Para la simulación en PVsyst se seleccionó el inversor de la marca GROWATT, referencia MIN 3800TL-XH-US. A continuación, se presentan las principales características del inversor.

**Tabla 21** Características principales Inversor

Descripción	Valores	Unidad
<b>Datos de Entrada</b>		
Potencia FV Máxima	7.600	W
Voltaje de arranque	80	V
Voltaje Nominal	600	V
Rango de voltaje de MPPT	50-550	V
No. MPPT/ No. Strings	2	#
Corriente máxima de entrada por MPPT	13,5	A
Corriente máxima de cortocircuito por MPPT	16,9	A
<b>Datos de Salida AC</b>		
Potencia nominal de CA	3.800	W

Voltaje nominal CA (Inversor Bifásico)	120 /240	V
Configuración Bifásica		
Frecuencia	50-60	Hz
Corriente Nominal de salida	21	A
Corriente de salida máxima	30	A
AC Grid Connection Type	L1/L2/N/PE	
Eficiencia máxima	98,20%	%

---

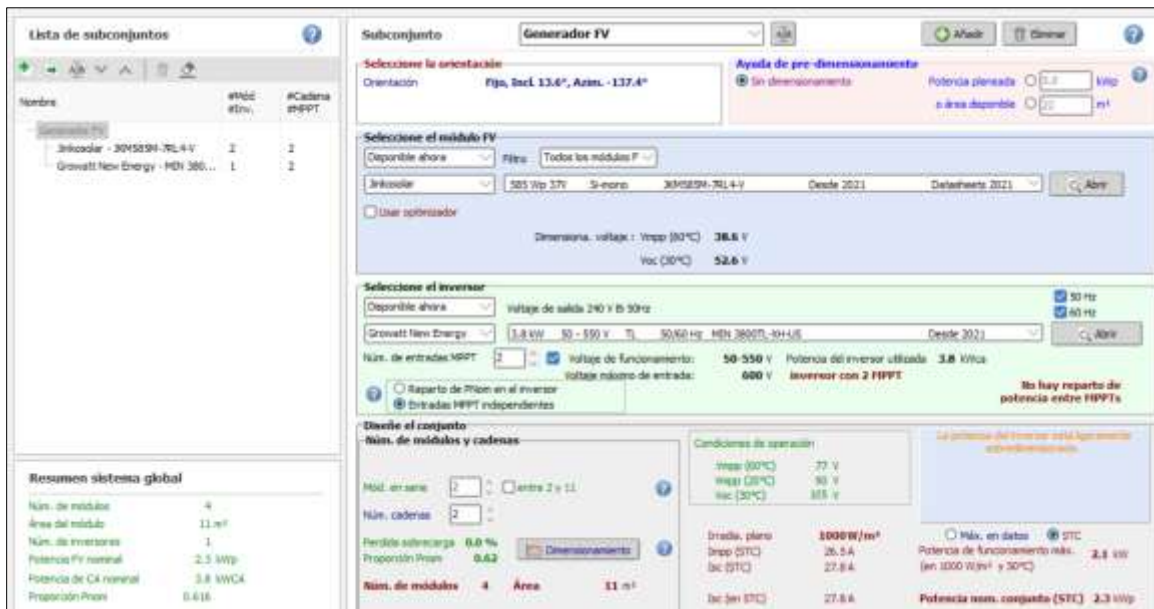


**Figura 31** Inversor Bifásico marca GROWWATT

El inversor de marca Growatt MIN 3800TL-XH-US es un inversor fotovoltaico Strings On-grid. Este equipo incorpora dos seguidores MPPT (Maximum Power Point Tracker) independientes, lo que le permite controlar de manera autónoma hasta dos cadenas de paneles con diferentes condiciones de irradiancia, orientación o inclinación.

Los controladores MPPT forman parte integral del inversor seleccionado, por lo que no se requiere un controlador externo.

Se procedió a seleccionar los paneles solares y el inversor en PVsyst, como se ve en la figura 32. Definición del arreglo fotovoltaico en PVsyst.



**Figura 32** Definición del arreglo fotovoltaico en PVsyst

*Elaboración propia PVsyst*

Desde la etapa de diseño se estableció una potencia objetivo de 2,2 kWp, calculada a partir de la demanda energética total de la finca y las horas pico solar de la finca.

Dado que el sistema propuesto para la finca es On-grid, es decir, conectado a la red, en los periodos en los que este la ensiladora operando, gran parte de la energía será suministrada por la red.

Cuando este equipo no esté en funcionamiento, el sistema fotovoltaico generara e inyectara energía a la red eléctrica, ayudando a compensar el consumo energético de la finca. El sistema no busca suplir cargas de alta potencia de forma instantánea sino compensar la demanda energética a través del tiempo.

Durante el proceso de selección del inversor se evidenció que no se disponía de inversores bifásicos comerciales con una potencia nominal exactamente equivalente a la potencia objetivo y que fueran compatibles con la conexión al tablero de distribución existente.

Debido a lo anterior, se seleccionó el inversor con base en la disponibilidad comercial, optando por un equipo de 3,8 kWp, el cual corresponde al inversor bifásico de menor potencia disponible en el mercado que se ajusta de forma adecuada a la potencia inicialmente planteada y a las condiciones del sistema eléctrico de la vivienda.

El sistema eléctrico de la casa de la finca es bifásico trifilar, lo que significa que la acometida eléctrica, el sistema de medición y el tablero de distribución están configurados con dos fases (F1 y F2) y un neutro. En esta configuración se dispone de una tensión línea a línea de 240 V y una tensión línea a neutro de 120 V, lo cual permite alimentar tanto cargas bifásicas como monofásicas.

Los equipos eléctricos de la vivienda se encuentran conectados al tablero de distribución y pueden clasificarse como bifásicos, bifásicos trifilares o monofásicos, dependiendo de sus requerimientos de tensión y tipo de conexión.

Como el sistema fotovoltaico propuesto es de tipo On-grid y emplea un inversor bifásico a 240 V (F1, F2 y un neutro), para operar en paralelo con la red eléctrica, el inversor se conectará directamente al tablero de distribución de la casa, permitiendo el suministro de la energía generada por el sistema fotovoltaico a los equipos eléctricos de la casa y, en caso de excedentes, su entrega a la red de Electrohuila.

Para cubrir la demanda energética de la finca se requieren 4 módulos solares, dos módulos en serie y con dos cadenas. Cada módulo fotovoltaico tiene dimensiones de 1,134 m de ancho por 2,411 m de largo, lo representa un área total de 10,94 m<sup>2</sup>.

Durante la visita técnica se verificó que el techo de la casa cuenta con un área disponible de 155 m<sup>2</sup>, la cual resulta suficiente para instalar el arreglo fotovoltaico en orientación vertical (retrato), incluyendo los espaciamientos necesarios entre los módulos.

El sistema fotovoltaico propuesto está conformado por 4 paneles solares, el cual tiene un peso total de 124,4 kg y un área total de 10,9 m<sup>2</sup>. Para realizar el análisis estructural y determinar el área efectiva sobre cubierta se debe tener en cuenta el peso de los paneles, los espacios y la estructura de soporte. La distribución del arreglo sobre la cubierta representa una carga adicional de 4,5 kg/m<sup>2</sup> (0,045 kN/m<sup>2</sup>) (137).

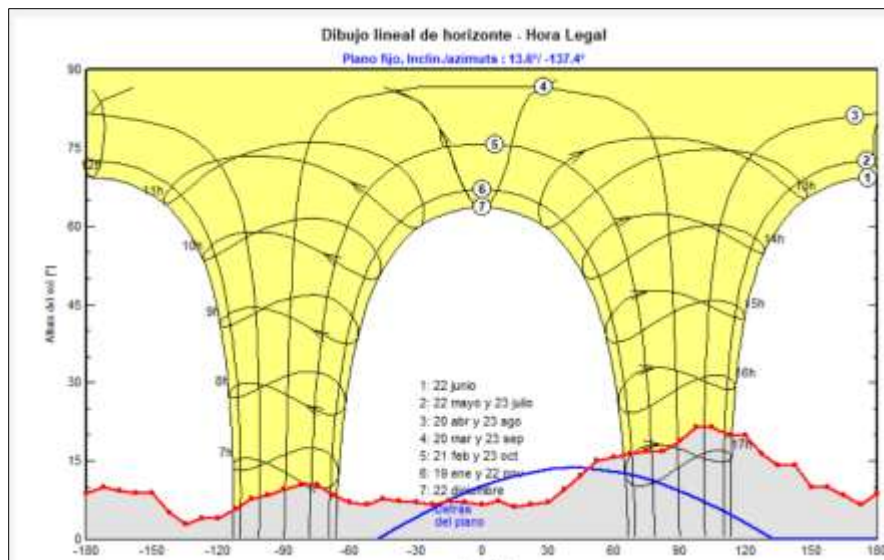
La casa de la finca Villa Mercedes objeto de estudio es a una edificación de construcción tradicional, compuesta por muros en mampostería en ladrillo y concreto que conforman las vigas y columnas de soporte alrededor de la casa. El techo está conformado por una estructura de vigas de madera, sobre la cual se dispone una cubierta liviana de lámina metálica tipo zinc.

En Colombia los criterios para el diseño estructural de edificaciones en Colombia se encuentran establecidos en el Reglamento de construcción Sismo-Resistente NSR-10 (138).

Este reglamento incluye el tratamiento de cargas muertas, cargas vivas y cargas ambientales que deben resistir los techos y cubiertas. En el Capítulo B-4 Cargas vivas, indica que las cargas vivas en cubiertas incluyan los efectos de materiales y equipos necesarios para el mantenimiento y acceso, además de las estructuras permanentes (138). Estos valores de

diseño estructural son significativamente mayores que la carga adicional de 4,5 kg/m<sup>2</sup> (0,045 kN/m<sup>2</sup>), que representa el sistema fotovoltaico propuesto, lo que indica que la cubierta de una vivienda típica en Colombia diseñada bajo la norma puede soportar con seguridad el peso del arreglo fotovoltaico sin requerir refuerzos estructurales adicionales.

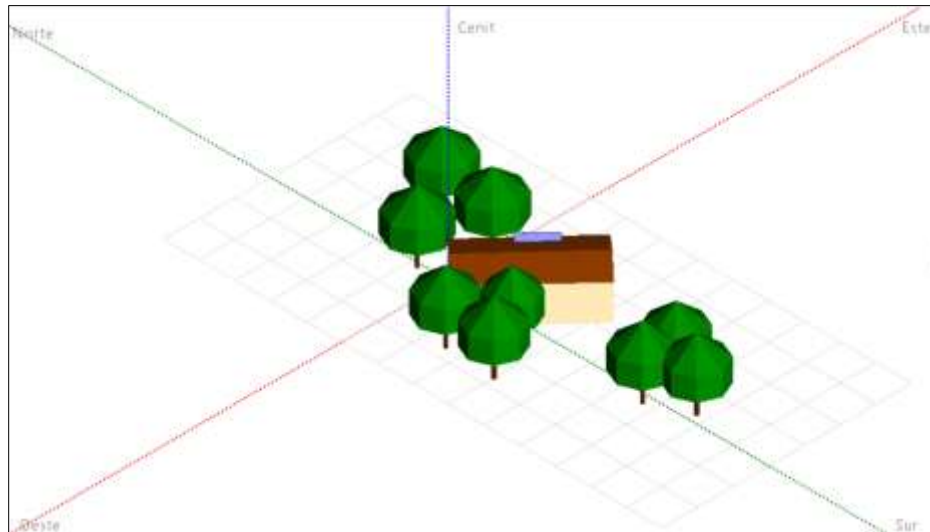
Posteriormente, se definió el perfil del horizonte del sistema fotovoltaico. PVSYST importa los datos del horizonte automáticamente de la web de PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System (Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica)).



**Figura 33** Figura 34 Definiciones Sombreado

*Elaboración propia PVsyst*

Se construyó la escena 3D de sombreado en PVsyst, teniendo en cuenta la inclinación, el área disponible (155 m<sup>2</sup>) en el techo de la casa, el número de paneles calculados y los árboles que se encuentran cerca al arreglo planteado.



**Figura 35** Construcción de la escena en PVsyst

*Elaboración propia PVsyst*

Con la ubicación y la cantidad de paneles solares definidos, se procedió a ejecutar la simulación en el software PVsyst obteniéndose los siguientes resultados que se presentan a continuación en la tabla 22.

**Tabla 22** Resultados PVsyst

<b>Descripción</b>	<b>Valores</b>	<b>Unid</b>
Cantidad de paneles solares	4	Und
Cantidad de inversores	1	Und
Energía producida	3.381,6	kWh/año
Producción específica	1.445	kWh/kWp/año
Proporción ratio PR	73,14	%

*Fuente: Elaboración propia PVsyst*

### **6.2.3 Dimensionamiento de un sistema de biodigestión anaeróbica**

La construcción del sistema de biodigestión anaeróbica para la finca Villa Mercedes se proyecta en un área contigua a la infraestructura existente, ubicada aproximadamente a 6

metros del establo o corral y a 8 metros de la vivienda principal. Esta disposición permite reducir las distancias de transporte del estiércol bovino desde el corral hasta el biodigestor y facilitar la supervisión diaria del sistema por parte del personal de la finca. De igual manera, la localización planteada se fundamenta en criterios técnicos para la selección del sitio en sistemas de biodigestión rural, los cuales sugieren ubicar el biodigestor cerca de la fuente de materia orgánica y del punto de aprovechamiento del biogás para minimizar la presencia de olores y garantizar condiciones adecuadas de habitabilidad (139). En la imagen aérea se aprecia el sector seleccionado, el cual cuenta con espacio suficiente para la zanja del biodigestor tubular, las líneas de alimentación y descarga, y el área de maniobra necesaria para las labores de operación y mantenimiento.



*Figura 36* Área donde se colocaría el biodigestor

#### **6.2.3.1 Selección del tipo de biodigestor**

La selección del tipo de biodigestor para la finca Villa Mercedes se basa en varios factores técnicos y operativos, tales como el volumen requerido, la producción de biogás esperada, la disponibilidad de recursos y las condiciones climáticas del entorno. Existen diferentes tipos de biodigestores, cada uno con ventajas y desventajas dependiendo de las condiciones locales, como se detalla en la Tabla 23. Entre ellos, el biodigestor hindú (campana flotante), taiwanés (tubular) y chino (cúpula fija) tienen características que los hacen más adecuados

para ciertos contextos, especialmente en zonas rurales donde los recursos son limitados y la mano de obra calificada es escasa.

*Tabla 23 Comparación cualitativa de funcionamiento y estructura de biodigestores aplicables a sistemas rurales*

<b>Tipo de Biodigestor</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Hindú (campana flotante)	El sistema incluye un tambor flotante (floating drum) utilizado para el almacenamiento del biogás (140).	El tambor y su soporte requieren materiales metálicos resistentes (140).
	La presión del gas depende del peso del tambor (141).  Permite la medición y extracción del biogás mediante válvulas conectadas al tambor (140).	Exposición a la corrosión si no se protegen los materiales (139).  Requiere mantenimiento periódico del sistema de almacenamiento de gas (140).
Taiwanés (tubular)	Construido con materiales plásticos flexibles y de bajo costo (142).	La vida útil depende de la calidad del plástico (142).
	Instalación sencilla con mano de obra local disponible (141).  El diseño permite adaptación a distintos volúmenes de producción (142).	Susceptible a daños mecánicos externos y radiación solar (141).  El sistema de almacenamiento de gas no incluye tambor rígido ni regulación de presión (141).
Chino (cúpula fija)	Estructura completamente cerrada construida en mampostería o concreto (140).	La construcción requiere cuidado para evitar fugas de gas (141).
	El gas se almacena en la parte superior del digestor (140).	Las fallas estructurales son más difíciles de localizar y reparar (140).

No incluye un gasómetro móvil; todo el almacenamiento se realiza dentro de la estructura (141). Se necesita control técnico durante la construcción (142).

El biodigestor tipo taiwanés (tubular) es particularmente adecuado para la finca Villa Mercedes debido a varias razones: su bajo costo de construcción, instalación rápida, fácil mantenimiento y su capacidad para adaptarse a climas cálidos, lo que es esencial en la región tropical donde se encuentra ubicada la finca. Este tipo de biodigestor tiene una vida útil de entre 5 a 10 años, lo cual es aceptable en el contexto de la finca, y su diseño permite una retención térmica natural, facilitando la actividad de los microorganismos metanogénicos a temperaturas promedio de 25 - 27 °C (143). Además, su flexibilidad modular y su capacidad para escalar según el crecimiento de la carga ganadera hacen que este tipo de biodigestor sea ideal para adaptarse a futuros cambios en la finca sin necesidad de grandes modificaciones estructurales.

En comparación, el biodigestor tipo hindú (campana flotante), aunque permite una producción de gas constante y tiene la ventaja de una visualización directa del nivel de gas, es costoso de construir y presenta alta pérdida de calor y mantenimiento frecuente debido a la corrosión y las fugas (56). Por otro lado, el biodigestor tipo chino (cúpula fija), a pesar de su alta durabilidad y buen aislamiento térmico, presenta una costosa construcción inicial y es difícil de reparar en caso de fallas, lo que lo hace menos adecuado para la finca, dado que se requiere un sistema de fácil mantenimiento (110).

**Tabla 24** Evaluación técnica según parámetros de diseño del sistema

<b>Criterio</b>	<b>Condición en Villa Mercedes</b>	<b>Hindú</b>	<b>Taiwanés</b>	<b>Chino</b>
Volumen requerido	12,06 m <sup>3</sup>	✓	✓	✓

Producción de biogás esperada	1,6 m <sup>3</sup> /día	✓	✓	✓
Disponibilidad de recursos	Presupuesto medio-bajo	✗	✓	✗
Condiciones climáticas	Clima cálido favorable	✗	✓	✓
Mano de obra calificada	Limitada en zonas rurales	✗	✓	✗
Facilidad de mantenimiento	Deseable bajo mantenimiento	✗	✓	✓
Vida útil	De preferencia mayor a 5 años	✗	✓	✓
Adaptabilidad / Escalabilidad	Posible aumento de carga ganadera en el futuro	✗	✓	✗

Nota: Elaboración propia

Para el dimensionamiento del sistema de biodigestión anaeróbica de la finca Villa Mercedes se consideraron las condiciones específicas del predio y los parámetros operativos calculados para esta instalación. Los resultados de los cálculos se presentan en la Tabla 25.

**Tabla 25** Cálculos realizados para el dimensionamiento del sistema de biodigestor

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia en la tesis
Vacas en establo consideradas para el sistema	N	15	Res	Cap. 6, descr. del hato; Tabla 16
Estiércol recolectable en establo	(m. estiércol)	108	kg/día	Tabla 16 – Estiércol promedio disponible
Humedad del estiércol	H	78,16	% bh	4.1.2.10 – “Sólidos totales y volátiles”
Sólidos totales del estiércol	TS	21,84	%	Ídem
Relación VS/TS	VS/TS	63,76	%	Ídem
Masa diaria de sólidos totales	m.TS	23,57	kg/día	4.1.2.10

Masa diaria de sólidos volátiles	m.VS	15,01	kg/día	4.1.2.10
Fracción de VS degradados en el proceso	f. deg	50	%	4.1.2.10
VS degradados diariamente	m.VS,deg	7,2	kg/día	4.1.2.10
Relación de dilución estiércol:agua	—	1 : 3	—	4.1.2.10 – “Carga diaria total de mezcla”
Carga diaria total de mezcla (estiércol + agua)	CTM	432	kg/día	Ídem
Densidad de la mezcla	-	1,025	kg/L	4.1.2.10 – “Volumen del biodigestor”
Tiempo de retención del sustrato	TRS	20	Días	Tabla 19 y 4.1.2.9–4.1.2.10
Volumen útil del biodigestor	Vu	8,44	m <sup>3</sup>	4.1.2.10
Fracción de volumen destinada a gas	-	0,30	—	4.1.2.10
Volumen de gas	Vg	3,62	m <sup>3</sup>	4.1.2.10
Volumen total de diseño del biodigestor	VT	12,06	m <sup>3</sup>	4.1.2.10
Producción específica de biogás	Qe	0,226 (226)	m <sup>3</sup> /kg VS (mL/g)	4.1.2.10; ref. (48)
Producción teórica diaria de biogás	Qg	1,6 (1600)	m <sup>3</sup> /día (L/día)	4.1.2.10 – “Estimación de producción de biogás”
Producción diaria de biol + digestato	m.efluente	424,8	kg/día	4.1.2.10 – “Estimación de biol y biodigestato”
Flujo Producción diaria de biol + digestato	Qb	0,41(414,3)	m <sup>3</sup> /día (L/día)	
Energía máxima disponible por el biogás		9,6	kWh/día	

*Nota: Elaboración propia*

Para establecer la superficie de geomembrana requerida a partir del volumen de diseño del biodigestor, se parte de un volumen total de 12,06 m<sup>3</sup> y se adopta un diámetro interno de 1,4 m, esto debido a que el ancho plano de una geomembrana comercial es de 2m (144). Considerando el biodigestor como un cilindro horizontal, se utiliza la expresión del volumen para relacionar longitud y diámetro; luego, esa longitud se sustituye en la expresión del área lateral, lo que permite obtener una relación directa entre el área lateral y el volumen, solo en función del diámetro escogido. Con estos valores se obtiene un área lateral aproximada de 34,3 m<sup>2</sup>; al adicionar el área de las dos tapas circulares se llega a una superficie total de geomembrana cercana a 37,4 m<sup>2</sup>, redondeando a 40 m<sup>2</sup> para la realización de hueco. A partir de la misma relación de volumen se puede estimar la longitud del cilindro, que resulta del orden de 7,8 m para el volumen y el diámetro adoptados.

$$V = \frac{\pi D^2}{4} * L$$

$$L = \frac{4V}{\pi D^2} = \frac{4 * 12,06}{\pi (1,4)^2} = 7,83 \cong 7,8 \text{ m}$$

$$A_{planta} = L * D = 7,8 * 1,4 = 11,03 \text{ m}^2$$

$$A_{lateral} = \pi L D = \pi * 7,8 * 1,4 = 34,3 \text{ m}^2$$

$$A_{tapas} = 2 * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 6,82 * 1,5 = 3,07 \text{ m}^2$$

### 6.2.3.2 Selección del Motogenerador

La elección del motogenerador adecuado para el sistema de aprovechamiento de biogás en la finca Villa Mercedes se basa en varios factores. Entre ellos se encuentran las especificaciones del biodigestor, la demanda energética de la finca y las características operativas del motogenerador. Actualmente, la finca presenta una demanda energética mensual de 88,038 kWh, que se espera aumente a 239,007 kWh/mes debido a la incorporación de equipos de ordeño mecánico y la automatización de procesos agropecuarios. Este crecimiento de la demanda requiere una solución energética que cubra tanto las necesidades presentes como las futuras.

Con base en lo reportado, para unidades de cogeneración alimentadas con biogás, se obtienen eficiencias eléctricas del orden del 30–35 % y eficiencias globales (eléctrica y térmica) cercanas al 70–75 % (145).

$$E_{electrica} = E_{biogas} * \eta_e$$

Con **35 %**:  $E_{electrica} = E_{biogas} * \eta_e = 9,6 * 0,35 = 3,36 \text{ kWh/d}$

Con **30 %**:  $E_{electrica} = E_{biogas} * \eta_e = 9,6 * 0,30 = 2,88 \text{ kWh/d}$

### Potencia continua si debe operar 24 horas

$$P_{24h} = \frac{E_{electrica}}{24h}$$

$$\text{Con } 35 \%: P_{24 h} = \frac{E_{\text{electrica}}}{24 h} = \frac{3,36}{24} = 0,14 \text{ Kw}$$

$$\text{Con } 30 \%: P_{24 h} = \frac{E_{\text{electrica}}}{24 h} = \frac{2,88}{24} = 0,12 \text{ Kw}$$

A partir de la energía eléctrica diaria disponible a partir del biogás (2,88–3,36 kWh/d para eficiencias de 30–35 %), la potencia continua equivalente, si se pretendiera operar 24 h, sería solo de 0,12–0,14 kW. Este valor es demasiado bajo para las necesidades de la finca y no coincide con potencias comerciales habituales de moto generadores. Por ello, se opta por dimensionar un equipo de aproximadamente 1 kW de potencia nominal, operado durante ventanas de 2,9–3,4 h/día, lo que permite aprovechar completamente la energía del biogás en periodos específicos de alta demanda (principalmente el ordeño y la iluminación del establo).

El equipo seleccionado corresponde a un motogenerador modelo DF1500BG de la marca Dingfeng, diseñado específicamente para operar con biogás como combustible. Este generador ofrece una potencia nominal de 1,0 kW y una potencia máxima de 1,2 kW, con salida monofásica a 110, 220 o 380 V, frecuencia seleccionable de 50 o 60 Hz, factor de potencia unitario y regulación automática de tensión mediante sistema AVR (146). Incorpora un motor DF168F-1 mono cilíndrico, de cuatro tiempos, refrigerado por aire y con distribución OHV, de 196 cm<sup>3</sup> de cilindrada, con sistema de arranque manual (recoil) o eléctrico, consumo específico de biogás de 0,7 m<sup>3</sup>/kWh y nivel de presión sonora del orden de 65 dB a 7 m, características que lo hacen compatible con la producción diaria estimada en el biodigestor de la finca Villa Mercedes y adecuado para aplicaciones rurales de pequeña escala. A continuación, se muestra el equipo seleccionado (Figura 37).



**Figura 37** Motogenerador 1kw (DF1500BG) (146)

**Tabla 26** Características técnicas del Motogenerador

Parámetro	Especificación
Modelo	DF1500BG
Potencia nominal	1,0 kW
Potencia máxima	1,2 kW
Tipo de generador	Monofásico, regulación AVR, factor de potencia 1,0
Tensión nominal de salida	110 / 220 / 380 V
Frecuencia	50 / 60 Hz
Motor	DF168F-1, mono cilíndrico, 4 tiempos, OHV, refrigerado por aire
Cilindrada	196 cm <sup>3</sup>
Combustible	Biogás
Consumo específico de biogás	0,7 m <sup>3</sup> /kWh
Sistema de arranque	Manual (recoil) / eléctrico
Nivel de ruido (a 7 m)	65 dB
Peso neto / bruto	41 / 43 kg
Dimensiones (L × A × H)	610 × 440 × 445 mm

*Nota:* Elaboración propia

Para estimar la fracción de la demanda eléctrica que puede ser cubierta con el biogás, se considera la producción teórica de 1,6 m<sup>3</sup>/día, con un poder calorífico inferior de 6 kWh/m<sup>3</sup>, lo que equivale a 9,6 kWh/día de energía química. Suponiendo una eficiencia eléctrica del motogenerador en el rango 30–35 %, la energía eléctrica útil disponible se sitúa entre 2,88 y 3,36 kWh/día. Si se compara este valor con la demanda proyectada de la finca (239,007 kWh/mes ≈ 7,97 kWh/día), el biogás permitiría cubrir aproximadamente entre 36 y 42 % de

la demanda diaria, por lo que el sistema de biodigestión se concibe como una fuente complementaria al sistema fotovoltaico y a la red eléctrica, y no como sustituto total del suministro convencional.

$$E_{demanda} = \frac{239,007}{30} = 7,97 \text{ kWh/d}$$

$$\text{Cobertura 35\%} \quad C_{35\%} = \frac{3,36}{7,97} * 100 \approx 42\%$$

$$\text{Cobertura 30\%} \quad C_{30\%} = \frac{2,88}{7,97} * 100 \approx 36\%$$

- **Ajustes necesarios para operar con biogás**

### **Sistema de Alimentación de Biogás**

El motogenerador DF1500BG está diseñado para operar con biogás a baja presión, del orden de 1–3 kPa, por lo que no se requiere compresión del gas. Con un consumo específico de 0,7 m<sup>3</sup>/kWh (141), el caudal máximo de biogás a plena carga ( $\approx 0,7$  m<sup>3</sup>/h) genera pérdidas de carga despreciables en la tubería de ½" prevista (longitudes del orden de 6–10 m). En consecuencia, el sistema se diseña sin compresor de biogás, incorporando únicamente una trampa de condensada modelo mod 2077000461016 y un regulador de baja presión R7 única etapa PS 1,38–22 mbar, ½" NPT, para estabilizar la alimentación al motogenerador que se encuentra costado en el sistema de purificación del gas.

### **Eliminación de H<sub>2</sub>S (Sulfuro de Hidrógeno)**

El H<sub>2</sub>S presente en el biogás es altamente corrosivo y, sino se remueve antes de la combustión, acelera el deterioro de las partes metálicas del motogenerador y reduce de forma significativa su vida útil. Para motores de combustión interna se recomienda mantener concentraciones de H<sub>2</sub>S por debajo de 100 ppm, por lo que resulta necesario incorporar una etapa de desulfurización previa al ingreso del gas al equipo. En sistemas de pequeña escala, como el de la finca Villa Mercedes, una solución técnica y económicamente adecuada es la adsorción en seco con medios férricos, utilizando viruta de hierro o lana de acero empacada

en una columna de PVC, donde el H<sub>2</sub>S reacciona con el óxido de hierro y se transforma en sulfuro de hierro insoluble (147).

El sistema propuesto consiste en un filtro vertical de PVC de 4" de diámetro y aproximadamente 1 m de altura, instalado en la línea de biogás entre la trampa de condensados y el regulador de baja presión. El interior del tubo se llena con un lecho empacado de lana de acero o chips de hierro fácilmente reemplazables. Ensayos reportados para este tipo de lechos muestran eficiencias de eliminación cercanas al 100 % hasta la saturación del medio, con capacidades típicas del orden de 0,2 kg de azufre removido por cada kg de óxido de hierro. Considerando la producción diaria de biogás y una concentración de H<sub>2</sub>S representativa para estiércol bovino, se estima que un lecho con alrededor de 1 kg de medio férrico puede operar entre 6 a 12 meses antes de requerir recambio, por lo que en la evaluación económica se contemplan tres recargas anuales de material desulfurizante (147). Para el caudal de biogás proyectado, el filtro vertical puede funcionar utilizando la presión generada por el biodigestor, sin necesidad de un compresor adicional. Sin embargo, si se manejaran caudales mayores o lechos más densos, podría ser necesario añadir presión para mantener un flujo adecuado a través del medio filtrante.

### **Tuberías**

En cuanto a las conexiones hidráulicas del sistema, se adopta tubería de PVC sanitario de 110 mm (4") de diámetro nominal tanto en la línea de alimentación del estiércol diluido como en la descarga del efluente. Este diámetro es ampliamente utilizado en biodigestores tubulares rurales porque facilita el paso de la mezcla estiércol-agua con sólidos en suspensión, reduciendo el riesgo de obturaciones, y coincide con lo recomendado en manuales de diseño (142).

Para la conducción del biogás, cuyos caudales diarios son del orden de unos pocos metros cúbicos y se manejan a bajas presiones, se selecciona tubería de PEAD o PVC hidráulico de ¾". Este diámetro se encuentra dentro del rango sugerido para plantas pequeñas, en las que tuberías de ½"-¾" son suficientes para longitudes típicas menores a 30–100 m, manteniendo

pérdidas de presión por fricción inferiores a 5 mbar y permitiendo una instalación económica y de fácil montaje (142).

### **6.3 Fase 3 - Evaluación técnico – económica comparativa**

#### **6.3.1 Criterios técnicos y económicos que permiten determinar la opción más conveniente para la finca Villa Mercedes.**

Los criterios técnicos y económicos considerados en la comparación de los dos sistemas de autogeneración tenemos:

- Capacidad de generación de energía de cada sistema frente a la demanda proyectada
- Confiabilidad del suministro de energía
- Inversión requerida para la implementación del sistema de autogeneración propuesto
- CAPEX y OPEX requerido para los sistemas de autogeneración propuesto.
- Rentabilidad del proyecto ROI,
- Periodo de recuperación del proyecto Payback.

Estos aspectos permiten evaluar la viabilidad de cada alternativa en el contexto del caso de estudio.

#### **6.3.2 Estimar los costos de la inversión (CAPEX) y operación y mantenimiento (OPEX) asociados a la tecnificación de la finca Villa Mercedes**

Los costos de los equipos requeridos para la tecnificación de la finca Villa Mercedes se presentan a continuación. El ordeño mecánico incluye la instalación y el impulsor eléctrico incluye el suministro y la mano de obra de instalación de las cercas eléctricas.

*Tabla 27 Estimación de CAPEX de equipos proyectados*

<b>Ítems</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario (COP)</b>	<b>Precio Total con IVA (COP)</b>	<b>Precio Total (USD)</b>
--------------	-----------------	------------------------------	-----------------------------------	---------------------------

Ordeño mecánico + Instalación (148)	1	\$ 5.250.000	\$ 6.247.500	\$ 1.562
Impulsor + Cerca Eléctrica + Instalación (149)	1	\$ 21.270.000	\$ 25.311.300	\$ 6.328
Bascula electrónica (150)	1	\$ 2.600.000	\$ 3.094.000	\$ 774
Pica pasto ensiladora (151)	1	\$ 12.600.000	\$ 14.994.000	\$ 5.950
<b>Total, CAPEX</b>	<b>4</b>		<b>\$ 49.646.800</b>	<b>\$ 14.613</b>

Las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos tales como el ordeño mecánico, la báscula electrónica, las cercas eléctricas y la ensiladora serán realizadas por el mayordomo de la finca. A continuación, en la tabla 28 se estima el OPEX requerido para el mantenimiento de los equipos proyectados.

*Tabla 28 Estimación de OPEX de equipos proyectados*

Ítem	Cantidad	Valor Unitario (COP)	IVA (19%)	Valor Total (COP/Año)
<b>Ordeño mecánico</b>	15	\$ 113.000	19%	\$ 509.320
Detergentes y desinfectantes (152)	12	\$ 25.000	19%	\$ 357.000
Filtro de aire bomba vacío (153)	2	\$ 40.000	19%	\$ 95.200
Lubricantes menores (154)	1	\$ 48.000	19%	\$ 57.120
<b>Cerca Eléctrica</b>	2	\$ 60.000	19%	\$ 142.800
Aisladores (155)	2	\$ 60.000	19%	\$ 142.800
<b>Bascula electrónica</b>	13	\$ 85.000	19%	\$ 166.600
Insumos limpieza (153)	12	\$ 5.000	19%	\$ 71.400
Calibración básica (156)	1	\$ 640.000	19%	\$ 761.600
<b>Pica pasto ensiladora</b>	13	\$ 110.000	19%	\$ 261.800
Lubricantes (154)	12	\$ 10.000	19%	\$ 142.800

Repuestos menores (155)	1	\$ 100.000	19%	\$ 119.000
<hr/>				
<b>Total, OPEX</b>	43	\$ 901.700		\$ 2.085.356

### **Sistema de ordeño mecánico**

Para el sistema de ordeño se planea una limpieza y desinfección diaria, cambio del filtro de la bomba cada 6 meses y lubricación mensual.

### **Cercas eléctricas**

Para las cercas eléctricas se planea una revisión visual mensual y cambio de aisladores de manera anual para los dos equipos.

### **Bascula electrónica**

Para la báscula electrónica se planea una limpieza diaria y una calibración cada 6 meses por una empresa certificada.

### **Pica pasto ensiladora**

Para la pica pasto se planea lubricación mensual y repuestos menores como cambio correas y/o cuchillas de manera anual.

### **6.3.3 Estimar los costos de la inversión (CAPEX) y operación y mantenimiento (OPEX) del sistema fotovoltaico**

El CAPEX del sistema fotovoltaico propuesto se determinó a partir de una cotización real entregada por un proveedor ubicado en el Departamento del Huila, especializado en diseño y montajes de sistemas solares fotovoltaicos (ver anexo A)

**Tabla 29 Costos CAPEX Sistema Fotovoltaico**

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Unitario (COP)</b>	<b>Valor Total (COP)</b>
<b>INVERSOR HIBRIDO 3.8kW ON/OFF GRID GROWATT</b>				
**Maxima potencia PV 7,6kWp **Cantidad de MPPT: 2	1	UN	\$ 6.600.000	\$ 6.600.000
**Maxima potencia AC 3,8kW **Exentos de IVA				
<b>ARREGLO SOLAR 2,34kWp</b>				
**Cantidad de paneles solares 4				
**Potencia pico panel solar 585W JINKO SOLAR	4	UN	\$ 530.000	\$ 2.120.000
**Panel solar mono facial **Exentos de IVA				
<b>RIEL EN ALUMINIO DE 4,7M</b> - Material para instalación paneles sobre cubierta	2	UN	\$ 195.000	\$ 390.000
<b>MCLAMP 35MM</b> - Material para instalación paneles sobre cubierta	6	UN	\$ 9.500	\$ 57.000
<b>ECLAMP 35MM</b> - Material para instalación paneles sobre cubierta	4	UN	\$ 9.500	\$ 38.000
<b>TORNILLO AUTOPERFORANTE 3"</b> - Material para instalación paneles sobre cubierta	8	UN	\$ 450	\$ 3.600
<b>GGROUP UNIVERSAL</b> - Material para instalación paneles sobre cubierta	2	UN	\$ 19.500	\$ 39.000
<b>GABINETE ELECTRICO DE PROTECCIONES AC</b>				
**Gabinete metálico 30*30*15cm **Break 2x20A	1	UN	\$ 255.000	\$ 255.000
**Barraje de derivación **Barraje tierra				
**Accesorios (canaleta ranurada, terminales tubulares, prensa estopas)				
<b>GABINETE ELECTRICO DE PROTECCIONES DC</b>				
**Gabinete metálico 30*30*15cm **Barraje de derivación	1	UN	\$ 230.000	\$ 230.000
**Accesorios (canaleta ranurada, terminales tubulares, prensa estopas)				
<b>BREAK 2X16A 500VDC - SUNTREE</b>	1	UN	\$ 97.000	\$ 97.000

<b>DPS 500VDC 40kA Tipo II - SUNTREE</b>	1	UN	\$ 133.000	\$ 133.000
<b>CABLEADO SOLAR 4MM NEGRO - LEADER</b>	12	ML	\$ 6.500	\$ 78.000
<b>CABLEADO SOLAR 4MM ROJO - LEADER</b>	12	ML	\$ 6.500	\$ 78.000
<b>CONECTOR MC4 1000VDC</b>	1	UN	\$ 15.000	\$ 15.000
<b>CABLE # 10 AWG VERDE</b>	12	ML	\$ 5.250	\$ 63.000
<b>ACOMETIDA PARA INTERCONEXION A TABLERO ELECTRICO</b>	12	ML	\$ 3.350	\$ 40.200
**Cable # 14 para fase, neutro, tierra				
**Terminales TUBULARES				
<b>TUBERIA IMC 3/4"</b>	3	UN	\$ 58.500	\$ 175.500
<b>ACCESORIOS PARA TUBERIA IMC 3/4"</b>	1	GL	\$ 100.000	\$ 100.000
<b>CORAZA AMERICANA 3/4"</b>	3	ML	\$ 4.900	\$ 14.700
<b>TERMINALES RECTOS CORAZA AMERICANA 3/4"</b>	1	GL	\$ 50.000	\$ 50.000
<b>TABLERO BIFASICO DE 6 CIRCUITOS</b>	1	UN	\$ 75.000	\$ 75.000
<b>SISTEMA DE PUESTA A TIERRA</b>				
**Varilla de cobre 5/8" 2,4m				
**Conector de varilla de cobre				
**Cable desnudo # 6 (6mts)	1	UN	\$ 890.000	\$ 890.000
**Bulto de hidrosolta 15kg				
**Tubería y accesorios PVC				
**Caja de inspección 30x30cm				
<b>MEDIDOR BIDIRECCIONAL CONFIGURADO EN LOS CUATRO CUADRANTES</b>	1	UN	\$ 1.200.000	\$ 1.200.000
<b>INSTALACION Y CONFIGURACION DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO Y CAMBIO DE TABLERO Y SISTEMA PUESTA A TIERRA</b>	1	UN	\$ 2.200.000	\$ 2.200.000
**Instalación y configuración de equipos de sistema solar fotovoltaico				
<b>TRAMITES ANTE OPERADOR DE RED - ELECTROHUILA Y CERTIFICACION RETIE</b>	1	UN	\$ 3.800.000	\$ 3.800.000
<b>Total, CAPEX</b>				<b>\$ 17.141.849</b>

El mantenimiento básico del sistema fotovoltaico se realizará según las recomendaciones generales establecidos en los manuales de los equipos. Las actividades de limpieza e inspección visual serán realizadas por el mayordomo de la finca, cuyo salario mínimo vital mensual es de \$1.750.905 COP/mes (157). En caso de encontrarse desviaciones o anomalías durante estas inspecciones, o los equipos no encienden, estas serán informadas al propietario de la finca para solicitar el servicio de revisión por una empresa especializada.

A partir del salario mensual devengado por el mayordomo, el OPEX se calcula en función del número de horas destinadas a dichas actividades de mantenimiento.

**Tabla 30 Estimación OPEX Sistema Fotovoltaico**

<b>Ítem</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Horas Día</b>	<b>Valor (COP/hora)</b>	<b>Valor Total (COP/Año)</b>
<b>Paneles fotovoltaicos</b>	2	8	\$ 7.295	\$ 116.720
Inspección visual y limpieza	2	8	\$ 7.295	\$ 116.720
<b>Inversor</b>	2	2	\$ 7.295	\$ 29.180
Limpieza de rejillas de ventiladores y revisión de externa	2	2	\$ 7.295	\$ 29.180
<b>Inspección de estructuras</b>	2	8	\$ 7.295	\$ 116.720
Inspección de cables, inspección de anclajes, aspectos exteriores	2	8	\$ 7.295	\$ 116.720
<b>Total, OPEX</b>	6			\$ 262.620

### **Paneles fotovoltaicos**

Los paneles solares se planea realizar inspección visual y limpieza de la superficie cada 6 o 12 meses dependiendo de las condiciones ambientales en la finca. Esta actividad comprende eliminación de polvo, hojas y excrementos de aves (158).

### **Inversor**

Para el inversor se planea realizar limpieza de rejillas de ventiladores y revisión de externa para determinar descoloración o daños de cables (159).

### **Inspección de estructuras**

Para la estructura se planea inspección de cables, inspección de anclajes, aspectos exteriores de las estructuras para identificar posibles grietas o fallas y tornillería anualmente (160).

### **6.3.4 Estimar los costos de la inversión (CAPEX) y operación y mantenimiento (OPEX) del sistema de Biodigestión**

El análisis arroja una inversión total de \$ 17.512.576 COP (\$ 4.372 USD), proporcionando una base financiera clara para la toma de decisiones y la planificación del proyecto.

*Tabla 31 Costos CAPEX Sistema de Biodigestión*

<b>Ítems</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario (COP)</b>	<b>Precio Total con IVA (COP)</b>	<b>Precio Total (USD)</b>
<b>Biodigestor</b>				
Geomembrana HDPE (0.75mm-1.0mm) 2m de ancho (144)	8	\$ 22.000	\$ 209.440	\$ 52
Tubería PVC Sanitaria 4" (entrada/salida) (161), (146)	2	\$ 222.000	\$ 528.360	\$ 132
Tubería PVC Presión 1/2" (línea de gas) (162), (146)	2	\$ 15.900	\$ 37.842	\$ 9

Accesorios (codos, válvulas, soldadura)	1	\$ 500.000	\$ 595.000	\$ 149
Materiales Obras Civiles (cemento, arena, etc.) (163), (164)	1	\$ 1.600.000	\$ 1.904.000	\$ 475
<b>Otros componentes</b>				
Motogenerador a biogás (1 kW) (146)	1	\$ 1.300.000	\$ 1.547.000	\$ 386
Sistema de purificación de biogás (165), (166)	1	\$ 3.500.000	\$ 4.165.000	\$ 1.040
<b>Estudios y análisis</b>				
Ingeniería de detalle y diseño del sistema	1	\$ 2.000.000	\$ 2.380.000	\$ 594
<b>Instalación</b>				
Mano de Obra no Calificada (Ayudante)	8 jornales	\$ 80.000	\$ 761.600	\$ 190
Mano de Obra Calificada (Maestro de obra)	8 jornales	\$ 130.000	\$ 1.237.600	\$ 309
Técnico Especializado (Instalación motogenerador)	3 jornales	\$ 250.000	\$ 892.500	\$ 223
Alquiler de Maquinaria (Retroexcavadora)	1 día	\$ 1.200.000	\$ 1.428.000	\$ 356
imprevistos (10%)	1	\$ 1.534.650	\$ 1.826.234	\$ 456
<b>Total, CAPEX</b>	<b>23</b>		<b>\$ 17.512.576</b>	<b>\$ 4.372</b>

A continuación, se presenta el OPEX estimado del sistema de Biodigestión:

*Tabla 32 OPEX estimado del sistema de Biodigestión*

Ítem	Cantidad	Precio Unitario (COP/Año)	IVA (19%)	Precio Total (COP/año)	Precio Total (USD/Año)
Mano de Obra Operativa (inspección y limpieza)	6	\$ 100.000	\$ 114.000	\$ 714.000	\$ 178
Consumibles y Repuestos del Motogenerador	1	\$ 500.000	\$ 95.000	\$ 595.000	\$ 149
Provisión Anual para Reemplazo de Geomembrana	1	\$ 176.000	\$ 33.440	\$ 209.440	\$ 52

Monitoreo y Análisis (tiras de pH, etc.)	1	\$ 200.000	\$ 38.000	\$ 238.000	\$ 59
Recolección de residuos y manejo del biol	365	\$ 6.500	\$ 450.775	\$ 2.823.275	\$ 705
Costos de monitoreo y análisis de biogás	1	\$ 300.000	\$ 57.000	\$ 357.000	\$ 89
Inspección de seguridad	1	\$ 150.000	\$ 28.500	\$ 178.500	\$ 45
<b>Total, OPEX</b>				<b>\$ 5.115.215</b>	<b>\$ 1.277</b>

Para el caso de la geomembrana, en el OPEX se incluye una provisión anual para su reemplazo, considerando que este material tiene una vida útil típica de 3 a 5 años en condiciones rurales y que puede requerir sustitución anticipada en caso de perforaciones o daños accidentales, donde esta provisión contempla tanto el recambio programado de la geomembrana principal siendo respaldo ante cualquier incidente que comprometa la estanqueidad del biodigestor. Del mismo modo, el rubro de recolección de residuos y manejo del biol y biodigestato se calculó suponiendo una hora diaria de trabajo dedicada a estas tareas durante los 365 días del año, valorada a 6.500 COP por hora, monto que se deriva del salario mínimo legal vigente en Colombia para 2025 y que representa el costo de la mano de obra no calificada necesaria para la operación rutinaria del sistema.

### **6.3.5 Realizar un análisis comparativo de los dos sistemas de autogeneración en términos técnicos y económicos.**

El presente apartado compara la viabilidad económica de dos alternativas de autogeneración para la finca Villa Mercedes, un sistema fotovoltaico conectado a red y un sistema de biodigestión con motogenerador. El análisis considera como base la demanda eléctrica asociada a la tecnificación y presenta los resultados mediante inversión inicial, costos anuales de operación y mantenimiento, ahorro anual por sustitución de compras de energía, beneficio neto anual, retorno sobre la inversión y tiempo de recuperación. Con este enfoque, el apartado mantiene un mismo marco de evaluación para ambas opciones y permite contrastar el comportamiento económico bajo condiciones equivalentes del caso de estudio.

La evaluación adopta como demanda oficial la obtenida del balance de cargas del escenario proyectado, correspondiente a 263,118 kWh/m, equivalente a 3.157,416 kilovatios hora por año. El cálculo del ahorro utiliza la tarifa del recibo analizado, fijada en 1.048 pesos colombianos por kilovatio hora. Para el sistema fotovoltaico, el apartado asume conexión a red e incorpora en la inversión los elementos de medición bidireccional y enlace eléctrico. Cuando el análisis no valora excedentes, el ahorro máximo anual se limita al consumo anual del predio.

De acuerdo con lo anterior, se realiza una comparativa energética y cobertura de demanda donde se presenta la producción energética anual de las alternativas y la compara con la demanda proyectada del predio. Para ello, la demanda mensual del balance de cargas se convierte a base anual mediante multiplicación por doce. Luego, el sistema fotovoltaico toma la energía anual reportada por PVsyst para la configuración final de cuatro módulos. Por su parte, el biodigestor parte de una energía eléctrica útil diaria entre 2,88 y 3,36 kWh y convierte ese rango a kWh por año con el factor de 365 días. Con ello, el apartado obtiene coberturas comparables.

Para asegurar comparabilidad entre alternativas, la energía “ahorrada” se define como la energía que efectivamente deja de comprarse a la red. En el sistema fotovoltaico on-grid se adopta un criterio conservador de autoconsumo, donde el ahorro no puede exceder la demanda anual del predio; por ello se usa el menor valor entre la generación anual estimada y la demanda anual. Para el sistema de biodigestión, la energía eléctrica útil se reporta como un rango asociado a la eficiencia eléctrica del motogenerador (30–35%), por lo que la energía anual disponible se expresa también como intervalo. Este enfoque permite comparar ambas tecnologías bajo un mismo indicador de cobertura de demanda.

*Tabla 33 Producción, energía útil y fracción de demanda cubierta*

<b>Variable</b>	<b>Sistema fotovoltaico on-grid, 4 módulos</b>	<b>Sistema de biodigestión con motogenerador</b>	<b>Cálculo usado</b>
<b>Demanda mensual, kWh por mes</b>	263,118	263,118	Dato del balance de cargas

<b>Demanda anual, kWh por año</b>	3.157,416	3.157,416	$263,118 \times 12 = 3.157,416$
<b>Energía anual disponible, kWh por año</b>	3.381,6	1.051,2 a 1.226,4	FV PV <sub>syst.</sub> Bio $2,88 \times 365 = 1.051,2$ y $3,36 \times 365 = 1.226,4$
<b>Energía ahorrada, kWh por año</b>	3.157,416	1.051,2 a 1.226,4	FV menor valor entre 3.381,6 y 3.157,416. Bio igual a energía útil anual
<b>Cobertura de demanda, porcentaje</b>	100,00	33,29 a 38,84	FV $3.157,416 \div 3.157,416 = 1,00$ . Bio $1.051,2 \div 3.157,416 = 0,3329$ y $1.226,4 \div 3.157,416 = 0,3884$
<b>Excedente anual FV, kWh por año</b>	224,184	—	$3.381,6 - 3.157,416 = 224,184$

*Fuente: Elaboración propia*

A partir de la relación entre generación y consumo anuales del predio. La tabla muestra que el sistema fotovoltaico alcanza cobertura total de la demanda anual proyectada (100%), lo cual implica que, bajo el supuesto conservador de autoconsumo, el predio podría satisfacer su requerimiento energético anual sin déficit energético estructural. En contraste, el biodigestor cubre únicamente entre 33,29% y 38,84% de la demanda, por lo que la finca requeriría necesariamente respaldo de red (u otra fuente complementaria) para cubrir el restante 61–67% del consumo anual. En términos operativos, esto significa que el biodigestor no reemplaza completamente el suministro eléctrico, sino que actúa como aporte parcial.

Adicionalmente, la generación fotovoltaica presenta un excedente anual estimado de 224,184 kWh/año respecto a la demanda, el cual podría inyectarse a la red según el esquema on-grid o aprovecharse para cargas futuras, ampliaciones o consumos desplazables. En Colombia, la Resolución CREG 030 de 2018, en el marco de la Ley 1715 de 2014, establece los mecanismos para la compensación y remuneración de excedentes de energía que los auto generadores y generadores distribuidos inyecten a la red mediante medición bidireccional, permitiendo que estos excedentes sean reconocidos como créditos o compensaciones bajo esquemas tarifarios regulados. No obstante, para no sobreestimar los beneficios en este estudio, el “ahorro energético” se limita al valor de la demanda anual; el excedente se reporta

como indicador de holgura energética y no como ahorro directo, salvo que se consideren explícitamente las condiciones de compensación de excedentes conforme al marco normativo aplicable.

Una vez determinada la capacidad de cada alternativa para cubrir la demanda del predio, el siguiente paso es evaluar si dicha cobertura es financieramente sostenible. En ese sentido, la comparación económica se estructura en dos componentes: (i) el CAPEX, como inversión inicial necesaria para instalar la solución, y (ii) el OPEX, como costo anual recurrente para operación y mantenimiento. Este contraste permite interpretar si una mayor cobertura energética se logra con un esfuerzo financiero razonable y si los costos anuales pueden ser cubiertos con los ahorros obtenidos por sustitución de energía comprada a la red.

*Tabla 34 comparativo de CAPEX y OPEX entre sistemas*

<b>Sistema</b>	<b>CAPEX total (COP)</b>	<b>OPEX total (COP/año)</b>
Solar fotovoltaico (On-grid)	\$ 17.141.849	262.620
Biomasa (Biodigestor + motogenerador)	\$ 17.512.576	\$ 5.115.215

*Fuente: Elaboración propia*

Los valores de CAPEX muestran inversiones cercanas, con \$17.141.849 COP en fotovoltaico y \$17.512.576 COP en biodigestión, lo que deja una diferencia de \$370.727 COP. En cambio, el OPEX anual del biodigestor alcanza \$5.115.215 COP, mientras que el sistema fotovoltaico presenta un gasto operativo de \$262.620 COP, reflejando el mantenimiento y costos asociados a los módulos y componentes del sistema. Por tanto, el flujo de caja del biodigestor debe cubrir un gasto recurrente más alto, incluso cuando su aporte eléctrico cubre solo una parte del consumo. La sección siguiente calculará el ahorro anual considerando la tarifa definida y la energía útil disponible de cada sistema.

En el sistema fotovoltaico, se incluyen las actividades rutinarias de limpieza e inspección realizadas por el personal existente (mayordomo), considerando un costo anual estimado de \$262.620 COP. Para los cálculos de indicadores anuales (beneficio neto, ROI y Payback), este valor se adopta como OPEX incremental, reflejando los gastos asociados al mantenimiento del sistema. Aunque representa un costo bajo, los resultados económicos deben interpretarse como un escenario base, que podría ajustarse si en el futuro se incorporan inspecciones especializadas, reposiciones o mantenimientos correctivos más complejos.

Para monetizar los ahorros energéticos, se adopta la tarifa unitaria del servicio de energía eléctrica (Electrohuila) como  $T=1.048$  COP/kWh. Esta tarifa representa el costo variable por consumo (COP por kWh) utilizado para valorar la energía que se deja de comprar a la red. Con esta base, se estima el ahorro anual asociado a cada alternativa como el producto entre energía ahorrada (kWh/año) y la tarifa T.

$$\text{Costo anual en electricidad Actual} = 3.157,416 \text{ kWh} * \$1,048 \text{ COP/kWh} = \\ \$3.308.972 \text{ COP/año}$$

En paralelo, se reporta el costo anual actual estimado a partir del consumo previo del predio, con el fin de contextualizar la magnitud del cambio esperado tras la tecnificación. Los indicadores económicos del proyecto (ahorro anual, beneficio neto, ROI y Payback) se calculan sobre la demanda proyectada asociada a la tecnificación, que constituye el escenario objetivo del estudio.

$$E_{\text{ahorrado,PV}} = \min(E_{\text{producida}}, E_{\text{dem,año}}) = \min(3.381,6, 3.157,416) = 3.157,416 \text{ kWh/año}$$

En el caso del biodigestor, la energía eléctrica útil disponible se reporta como un rango, debido a la variación de la eficiencia eléctrica del motogenerador (30%–35%). Por tanto, la energía ahorrada anual se calcula a partir del valor diario estimado:

$$\text{Para un mínimo (30\%)} \quad E_{\text{ahorrado,año,biomasa}} = 2,88 \times 365 = 1051,2 \text{ kWh/año}$$

$$\text{Para un máximo (35\%)} \quad E_{\text{ahorrado,año,biomasa}} = 3,36 \times 365 = 1226,4 \text{ kWh/año}$$

Una vez definida la energía ahorrada anual, el ahorro económico anual se calcula multiplicando por la tarifa:

$$A_{anual} = E_{ahorrado,año} \times T$$

$$A_{anual,FV} = 3157,41 \times T = 3.308.971,96$$

$$A_{anual,Biomasa} = 1051,2 \times T = 1.101.657,6$$

$$A_{anual,Biomasa} = 1226,4 \times T = 1.285.267,2$$

Los resultados muestran que, bajo la tarifa adoptada, el sistema FV genera un ahorro anual mayor debido a su mayor energía ahorrada (cobertura total de la demanda), mientras que el biodigestor presenta un ahorro anual inferior al cubrir únicamente una fracción del consumo. En consecuencia, el ahorro anual del biodigestor debe evaluarse junto con su costo recurrente de operación (OPEX).

El beneficio neto anual se define como el ahorro anual menos los costos de operación y mantenimiento (OPEX):

$$B = A - OPEX$$

Para el sistema fotovoltaico se considera un OPEX incremental de \$262.620 COP/año, correspondiente a las actividades de mantenimiento rutinario realizadas por el personal existente (mayordomo) y los costos asociados a componentes menores. Por tanto, el beneficio neto anual se calcula como:

$$B_{FV} = 3.308.971,96 - 262.620 = 3.046.352$$

Para el caso de la biomasa, se usa:

$$B_{biomasa} = 1.101.657,6 - 5.115.215 = -4.013.557$$

$$B_{biomasa} = 1.285.267,2 - 5.115.215 = -3.829.948$$

Al incorporar el OPEX, el sistema FV mantiene un beneficio neto positivo en el escenario base (OPEX incremental cero), mientras que el biodigestor presenta beneficios netos negativos en ambos escenarios de eficiencia (30% y 35%). Esto indica que, con la tarifa y los costos de operación estimados, los ahorros del biodigestor no son suficientes para cubrir sus egresos anuales de operación, incluso en el escenario de mayor eficiencia eléctrica.

El retorno sobre la inversión (ROI) anual se calcula como:

$$ROI\% = \frac{B}{CAPEX} * 100$$

Sabiendo que el CAPEXFV=17.141.849 COP y CAPEXbio=17.512.576 COP, se establece que,

$$ROI\%_{PV} = \frac{3.046.352}{17.141.849} * 100 = 17,8\%$$

$$ROI\%_{biomasa} = \frac{-4.013.557}{17.512.576} * 100 = -23,4\%$$

$$ROI\%_{biomasa} = \frac{-3.829.948}{17.512.576} * 100 = -21,9\%$$

En este caso, el sistema fotovoltaico presenta un ROI anual positivo, mientras que el biodigestor arroja ROI negativos, coherentes con sus beneficios netos anuales.

$$Payback_{PV} = \frac{CAPEX}{B} = \frac{17.141.849}{3.046.352} = 5,6 \text{ años}$$

El Payback simple se calcula únicamente cuando el beneficio neto anual es positivo, pues representa el número de años requeridos para recuperar la inversión inicial a partir del flujo neto anual. Por tanto, el Payback del sistema FV es de 5,6 años, mientras que para el biodigestor no se reporta Payback, dado que el beneficio neto es negativo y, bajo los supuestos evaluados, el proyecto se clasifica como no recuperable.

Con el propósito de complementar el análisis de rentabilidad estática (ROI y Payback) y determinar la sostenibilidad financiera de las alternativas a largo plazo, se incorporan el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) como indicadores dinámicos de evaluación.

- **Cálculo para el Sistema Solar Fotovoltaico**

**VPN**

Calculamos el factor de anualidad:

$$\frac{1 - (1,12)^{-25}}{0,12} = 7,8431$$

$$VPN = -17.141.849 + (3.046.352 \times 7,8431)$$

$$VPN = -17.141.849 + 23.892.963$$

$$VPN = \$6.751.114$$

**Resultado de la TIR:** Al despejar la tasa que iguala el VPN a cero con una recuperación (Payback) de 5,6 años, se obtiene:

$$TIR = 17,45\%$$

- **Cálculo para el Sistema de Biomasa**

$$VPN = -17.512.576 + (-3.829.948 \times 7,8431)$$

$$VPN = -17.512.576 - 30.038.815$$

$$VPN = -\$47.551.391$$

**Resultado de la TIR:**

$$TIR = \text{No aplica} - \text{Negativa}$$

Dado que los flujos de caja anuales son negativos (el costo de operar el sistema es mayor que el ahorro), el proyecto nunca recupera la inversión inicial.

El contraste entre alternativas sugiere alcances operativos distintos: el sistema fotovoltaico permite atender la demanda anual proyectada del predio y aporta margen ante variaciones de consumo, mientras que el biodigestor solo reduce parcialmente las compras a la red, por lo que no elimina la dependencia del suministro externo en el escenario de tecnificación. Esta diferencia es relevante porque el objetivo no es únicamente generar energía, sino asegurar continuidad de servicio para las cargas proyectadas.

En lo financiero, el CAPEX similar pierde peso frente al desempeño anual, ya que, con la tarifa adoptada, el fotovoltaico mantiene un flujo neto positivo y recuperación en un horizonte definido, mientras que el biodigestor presenta déficit anual debido a que su OPEX supera el valor monetario de la energía que desplaza, lo que impide su recuperación bajo los supuestos evaluados. Por tanto, al integrar desempeño energético y resultados económicos, se selecciona el sistema fotovoltaico on-grid como alternativa principal para la finca, y la biodigestión se pudiese considerar en un futuro únicamente como complemento o como opción sujeta a un rediseño operativo que reduzca OPEX y/o incorpore ingresos adicionales por coproductos.

## Capítulo 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio evaluó comparativamente dos sistemas de autogeneración a pequeña escala bajo una configuración on-grid, determinando su viabilidad técnica y financiera para responder a un incremento del 171,5 % en la demanda energética (de 88 a 239 kWh/mes) derivado de la tecnificación de la finca Villa Mercedes. Los hallazgos permiten establecer que la selección de la fuente energética no depende solo de la disponibilidad del recurso, sino de la eficiencia con la que este se traduce en ahorros operativos reales.

#### **7.1 Caracterizar la disponibilidad de recursos renovables**

Se confirmó que la finca Villa Mercedes posee un potencial solar excepcional con una irradiancia de 5,45 kWh/m<sup>2</sup>/día, cuya estabilidad anual garantiza una generación fotovoltaica predecible. Esta característica es crítica para sistemas conectados a red, pues asegura que los excedentes generados compensen eficazmente el consumo nocturno. En contraste, aunque el recurso biomásicos (108 kg/día de estiércol) posee propiedades fisicoquímicas aptas para la digestión anaerobia, su limitado volumen disponible constituye una barrera estructural que impide alcanzar la autonomía energética total, relegando a la biomasa a un papel meramente complementario.

#### **7.2 Dimensionar sistemas de autogeneración conectados a red**

El análisis técnico revela una brecha significativa en la capacidad de respuesta de ambas tecnologías. Mientras que el sistema fotovoltaico (2,34 kWp) logra cubrir el 100 % de la demanda anual proyectada, el sistema de biodigestión con motogenerador solo alcanza a suplir entre el 36 % y el 42 % de la misma. desde una perspectiva crítica, esto implica que el biodigestor mantiene una dependencia externa de la red de entre el 61 % y 67 %, lo que limita su capacidad para blindar a la finca contra variaciones tarifarias o fallas en el suministro convencional.

### **7.3 Análisis técnico y económico comparativo bajo esquema on-grid**

La evaluación financiera dinámica evidencia una diferencia radical en la rentabilidad de las inversiones analizadas. El sistema solar fotovoltaico se consolida como una inversión robusta con un valor presente neto de \$6.751.114 y una tasa interna de retorno del 17,45 %, cifra que es superior a la tasa de descuento aplicada. Su retorno sobre la inversión del 17,8 % y un periodo de recuperación de 5,6 años demuestran que el ahorro generado por el desplazamiento de compras de energía a la red es suficiente para amortizar la inversión inicial y cubrir los bajos costos operativos anuales de \$262.620.

Por el contrario, el sistema de biomasa resulta financieramente inviable bajo las condiciones evaluadas, presentando un valor presente neto negativo de -\$47.551.391 y una tasa interna de retorno que no aplica por ser negativa. La inviabilidad radica en que sus costos operativos anuales, estimados en \$5.115.215, superan ampliamente los ahorros generados por la sustitución de energía, los cuales oscilan entre \$1.101.657 y \$1.285.267 anuales. Esto crea un déficit estructural que hace que el proyecto de biomasa nunca logre recuperar la inversión inicial de \$17.512.576.

### **CONCLUSIÓN GENERAL**

El análisis comparativo concluye que el sistema solar fotovoltaico es la única solución técnica y financieramente coherente para fortalecer la competitividad de la finca Villa Mercedes. Su capacidad para anular el costo del consumo proyectado mediante la inyección de excedentes, sumada a una operatividad simplificada, lo sitúa como un modelo replicable en el Huila. Por el contrario, el modelo de biomasa a esta escala, a pesar de su viabilidad técnica, carece de racionalidad económica bajo los supuestos actuales, requiriendo un rediseño que reduzca drásticamente su OPEX o incremente la escala de producción para ser considerado en el futuro

## REFERENCIAS

1. **DANE-IGAC. Mapa Digital Cobertura Rural de Energía Eléctrica. República de Colombia. Año 2014. [Internet]. 2019 [cited 2026 Feb 20]. Available from: <https://metadatos.icde.gov.co/geonetwork/srv/api/records/cc3e59b2-0d18-45b5-8837-334797115d4b>**
2. **MINAMBIENTE. Energía renovable en Zonas No Interconectadas. 2025.**
3. **UNIVERSIDAD EIA. Economía del Huila, análisis del departamento. | Universidad EIA [Internet]. 2024 [cited 2026 Feb 20]. Available from: <https://www.eia.edu.co/portfolio/economia-del-huila-analisis-del-departamento/>**
4. **Soomar AM, Hakeem A, Messaoudi M, Musznicki P, Iqbal A, Czapp S. Solar Photovoltaic Energy Optimization and Challenges. Frontiers in Energy Research. Frontiers Media S.A.; 2022. doi:10.3389/fenrg.2022.879985**
5. **Sagastume Gutiérrez A, Cabello Eras JJ, Hens L, Vandecasteele C. The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia. J Clean Prod. 2020 Oct 1;269:122317. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2020.122317**
6. **Hernández-Sarabia M, Sierra-Silva J, Delgadillo-Mirquez L, Ávila-Navarro J, Carranza L. The potential of the biodigester as a useful tool in coffee farms. Applied Sciences (Switzerland). 2021 Aug 1;11(15). doi:10.3390/app11156884**
7. **Tan WH, Mohamad-Saleh J. Critical Review on Interrelationship of Electro-Devices in PV Solar Systems with Their Evolution and Future Prospects for MPPT Applications. Energies. MDPI; 2023. doi:10.3390/en16020850**
8. **Huila - Wikipedia, la enciclopedia libre [Internet]. 2025 [cited 2025 Jul 15]. Available from: <https://es.wikipedia.org/wiki/Huila>**
9. **Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. DANE - Cuentas nacionales departamentales: PIB por departamento [Internet]. 2025 [cited 2025 Jul 15]. Available from: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>**
10. **Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. DANE - Información económica y sociodemográfica desagregada a nivel municipal [Internet]. 2023 [cited 2025 Jul 15]. Available from: <https://www.dane.gov.co/index.php/actualidad-dane/5607-informacion-economica-y-sociodemografica-desagregada-a-nivel-municipal>**
11. **Mojica Flórez J. Huila Documento regional [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 20]. Available from: <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/huila/historia.html>.**


12. **Federación Colombiana de Ganaderos. Inventario Ganadero | Fedegán** [Internet]. [cited 2025 Jul 15]. Available from: <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/inventario-ganadero>
13. **Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. DANE - Encuesta de sacrificio de ganado (ESAG)** [Internet]. 2025 [cited 2025 Jul 15]. Available from: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-de-sacrificio-de-ganado>
14. **Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. La ganadería bovina de doble propósito, una actividad productiva sostenible bajo las buenas prácticas ganaderas (BPGs)** [Internet]. 2015 Apr. Report. Available from: <http://sucre.gov.co>
15. **González-Quintero R, Barahona-Rosales R, Bolívar-Vergara DM, Chirinda N, Arango J, Pantévez HA, et al. Technical and environmental characterization of dual-purpose cattle farms and ways of improving production: A case study in Colombia. Pastoralism.** 2020 Dec 1;10(1). doi:10.1186/s13570-020-00170-5
16. **Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. Boletín 6: Infraestructura de las unidades de producción agropecuaria (UPA).** 2014.
17. **Contexto Ganadero. Importancia y beneficios de tener una báscula ganadera | CONtexto Ganadero** [Internet]. 2023 [cited 2025 Sep 27]. Available from: [https://www.contextoganadero.com/economia/importancia-y-beneficios-de-tener-una-bascula-ganadera?utm\\_source](https://www.contextoganadero.com/economia/importancia-y-beneficios-de-tener-una-bascula-ganadera?utm_source)
18. **ElectroMechAgri. Ordeño robótico vs. sala de ordeño manual | Electromech Agri** [Internet]. 2025 [cited 2025 Sep 27]. Available from: [https://www.electromechagri.com/robotic-milking-vs-parlour/?utm\\_source](https://www.electromechagri.com/robotic-milking-vs-parlour/?utm_source)
19. **Mauricio Perfetti del Corral Subdirector Carlos Felipe Prada Lombo D. 3 er Censo Nacional Agropecuario CENSO NACIONAL AGROPECUARIO Sexta entrega de resultados 2014-Cifras definitivas.** 2015 Jul. Report.
20. **Agencia de Desarrollo Rural. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Agencia de Desarrollo Rural. Huila.** 2025.
21. **López AR, Krumm A, Schattenhofer L, Burandt T, Montoya FC, Oberländer N, et al. Solar PV generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market. Renew Energy.** 2020 Apr 1;148:1266–79. doi:10.1016/j.renene.2019.10.066
22. **Rahman MM, Khan I, Field DL, Techato K, Alameh K. Powering agriculture: Present status, future potential, and challenges of renewable energy applications. Renew Energy.** 2022 Apr 1;188:731–49. doi:10.1016/J.RENENE.2022.02.065

23. **Morales-Máximo CN, López-Sosa LB, Rutiaga-Quiñones JG, Corral-Huacuz JC, Aguilera-Mandujano A, Pintor-Ibarra LF, et al. Characterization of Agricultural Residues of Zea mays for Their Application as Solid Biofuel: Case Study in San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Energies (Basel)*. 2022 Oct 1;15(19). doi:10.3390/en15196870**
24. **Garfí M, Martí-Herrero J, Garwood A, Ferrer I. Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016 Jul 1;60:599–614. doi:10.1016/J.RSER.2016.01.071**
25. **Dasí-Crespo D, Roldán-Blay C, Escrivá-Escrivá G, Roldán-Porta C. Evaluation of the Spanish regulation on self-consumption photovoltaic installations. A case study based on a rural municipality in Spain. *Renew Energy*. 2023 Mar 1;204:788–802. doi:10.1016/j.renene.2023.01.055**
26. **Saleem M. Possibility of utilizing agriculture biomass as a renewable and sustainable future energy source. *Heliyon*. Elsevier Ltd; 2022. doi:10.1016/j.heliyon.2022.e08905**
27. **Ali F, Dawood A, Hussain A, Alnasir MH, Khan MA, Butt TM, et al. Fueling the future: biomass applications for green and sustainable energy. *Discover Sustainability*. Springer Nature; 2024. doi:10.1007/s43621-024-00309-z**
28. **Aravani VP, Sun H, Yang Z, Liu G, Wang W, Anagnostopoulos G, et al. Agricultural and livestock sector's residues in Greece & China: Comparative qualitative and quantitative characterization for assessing their potential for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022 Feb 1;154:111821. doi:10.1016/J.RSER.2021.111821**
29. **Babu S, Singh Rathore S, Singh R, Kumar S, Singh VK, Yadav SK, et al. Exploring agricultural waste biomass for energy, food and feed production and pollution mitigation: A review. *Bioresour Technol*. 2022 Sep 1;360:127566. doi:10.1016/J.BIORTECH.2022.127566 PubMed PMID: 35788385.**
30. **Rodríguez Romero TE, Cabello Eras JJ, Sagastume Gutierrez A, Mendoza Fandiño JM, Rueda Bayona JG. The Energy Potential of Agricultural Biomass Residues for Household Use in Rural Areas in the Department La Guajira (Colombia). *Sustainability (Switzerland)*. 2025 Feb 1;17(3). doi:10.3390/su17030974**
31. **Meneses-Quelal WO, Velázquez-Martí B, Gaibor-Chávez J, Niño-Ruiz Z. Biochemical potential of methane (BMP) of camelid waste and the Andean region agricultural crops. *Renew Energy*. 2021 May 1;168:406–15. doi:10.1016/J.RENENE.2020.12.071**
32. **Velásquez-Piñas JA, Calle-Roalcaba OD, Miramontes-Martínez LR, Alonso-Gómez LA. Evaluación económica y ambiental de las tecnologías de utilización**

del biogás y perspectivas del análisis multicriterio. *Revista ION*. 2023 Feb 28;36(1). doi:10.18273/revion.v36n1-2023003

33. Rasapoor M, Young B, Brar R, Sarmah A, Zhuang WQ, Baroutian S. Recognizing the challenges of anaerobic digestion: Critical steps toward improving biogas generation. *Fuel*. 2020 Feb 1;261:116497. doi:10.1016/J.FUEL.2019.116497
34. Lizeth K, Niño S, Químico I. EMMANUEL WUIZA MOSQUERA Proyecto integral de grado para optar al título de. 2021.
35. Zheng Z, Cai Y, Zhang Y, Zhao Y, Gao Y, Cui Z, et al. The effects of C/N (10–25) on the relationship of substrates, metabolites, and microorganisms in “inhibited steady-state” of anaerobic digestion. *Water Res*. 2021 Jan 1;188:116466. doi:10.1016/J.WATRES.2020.116466 PubMed PMID: 33027695.
36. González R, Peña DC, Gómez X. Anaerobic Co-Digestion of Wastes: Reviewing Current Status and Approaches for Enhancing Biogas Production. *Applied Sciences (Switzerland)*. MDPI; 2022. doi:10.3390/app12178884
37. Issahaku M, Derkyi NSA, Kemausuor F. A systematic review of the design considerations for the operation and maintenance of small-scale biogas digesters. *Heliyon*. 2024 Jan 15;10(1). doi:10.1016/j.heliyon.2024.e24019
38. Cremonez PA, Teleken JG, Weiser Meier TR, Alves HJ. Two-Stage anaerobic digestion in agroindustrial waste treatment: A review. *J Environ Manage*. 2021 Mar 1;281:111854. doi:10.1016/J.JENVMAN.2020.111854 PubMed PMID: 33360925.
39. Sotaquira Medina MF. Diseño de un biodigestor para el aprovechamiento de la materia orgánica generada en la Plaza de Mercado del municipio de Sogamoso - Boyacá (Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD). Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD. 2021.
40. Triviño-Pineda JS, Sanchez-Rodriguez A, Peláez NP. Biogas production from organic solid waste through anaerobic digestion: A meta-analysis. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024 Jun 1;9. doi:10.1016/j.csee.2024.100618
41. Lozano Ruíz AC, Sánchez Montealegre CA, Ardila Marín JG. Evaluación del potencial de generación de biogás de un biodigestor de excremento vía simulación con el software SIMBA®. *Ingeniería y Región*. 2020 Dec 28;24:72–85. doi:10.25054/22161325.2779
42. Cai Y, Zheng Z, Wei L, Zhang H, Wang X. The characteristics of multi-substrates (low and high C/N) anaerobic digestion: focus on energy recovery and the succession of methanogenic pathway. *Bioresour Technol*. 2022 Jan

1;343:125976. doi:10.1016/J.BIORTECH.2021.125976 PubMed PMID: 34688056.

43. Camilo J, Aguirre M, Esteban J, López L. Evaluación de la producción de biogás a partir de estiércol vacuno recolectado en la finca la carbonera [Internet]. Fundación Universidad de América; 2020 [cited 2025 Jul 28]. Available from: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7780>
44. Barreda Del Carpio JE, Ancco Mamani MR, Nuñez Chambi AD, Aguirre Gamero CE, Tejada Meza K, Pacheco Pacheco GM. Co-Digestión de Tres Tipos de Estiércol (Vaca, Cuy y Cerdo) para Obtener Biogás en el Sur del Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*. 2022 Aug 25;24(3):174–81. doi:10.18271/ria.2022.457
45. IEA. Outlook for biogas and Prospects for organic growth World Energy Outlook Special Report biomethane. 2020.
46. Jameel MK, Mustafa MA, Ahmed HS, Mohammed A jassim, Ghazy H, Shakir MN, et al. Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. *Results in Chemistry*. Elsevier B.V.; 2024. doi:10.1016/j.rechem.2024.101549
47. Quipuzco Ushñahua L, Baldeón Quispe W, Tang Cruz OE. Evaluación de la calidad de biogas y biol a partir de dos mezclas de estiércol de vaca en biodigestores tubulares de PVC. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, ISSN-e 1682-3087, ISSN 1561-0888, Vol 14, N° 27, 2011, págs 1-8 [Internet]. 2011 [cited 2025 Jul 28];14(27):1–8. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8135950&info=resumen&idiona=ENG>
48. Román Salinas V, Roque Huanca B. PRODUCCIÓN DE METANO DE LA EXCRETA ANIMAL PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN LA REGIÓN ALTOANDINA. *Revista de Investigaciones*. 2022 Dec 30;11(4):239–53. doi:10.26788/ri.v11i4.3514
49. DIREENERGY. ¿Qué instalaciones solares de autoconsumo existen? | DIREENERGY  [Internet]. 2020 [cited 2026 Feb 20]. Available from: <https://www.direenergy.net/index.php/blog/tipos-instalaciones-solares/?utm>
50. Luis Arturo Gil Ramírez. Vista de Biofertilizante “biol”: caracterización física, química y microbiológica | *Revista Alfa* [Internet]. 2023 [cited 2026 Feb 20]. Available from: <https://www.revistaalfa.org/index.php/revistaalfa/article/view/273/695>
51. Manuel Ramos Botello Y, Alexander Bosch Cabrera J, Misael Arias Hidalgo R, Santana Reyes A, Ramón Gutiérrez Toledo D. Artículo Original

**Dimensionamiento de un biodigestor para el tratamiento de excretas de cerdos**  
**Dimensioning of a biodigester for the treatment of pig excreta** Este documento  
posee una licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0  
Internacional. *Revista Cubana de Ingeniería*. 2021;XIII(1):317.

52. **Jaime Marti Herrero. Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación (2008). 2008.**
53. **Vanegas M, Romani F, Jiménez M. Pilot-Scale Anaerobic Digestion of Pig Manure with Thermal Pretreatment: Stability Monitoring to Improve the Potential for Obtaining Methane. Processes. 2022 Aug 1;10(8). doi:10.3390/pr10081602**
54. **Paladino O. Data Driven Modelling and Control Strategies to Improve Biogas Quality and Production from High Solids Anaerobic Digestion: A Mini Review. Sustainability (Switzerland). MDPI; 2022. doi:10.3390/su142416467**
55. **Nwokolo N, Mukumba P, Obileke K, Enebe M. Waste to energy: A focus on the impact of substrate type in biogas production. Processes. MDPI AG; 2020. p. 1–21. doi:10.3390/pr8101224**
56. **Díaz-Vázquez D, Alvarado-Cummings SC, Meza-Rodríguez D, Senés-Guerrero C, de Anda J, Gradilla-Hernández MS. Evaluation of biogas potential from livestock manures and multicriteria site selection for centralized anaerobic digester systems: The case of Jalisco, Mexico. Sustainability (Switzerland). 2020 May 1;12(9). doi:10.3390/SU12093527**
57. **Seclen Castañeda O. Generación de Electricidad a partir de Biogás obtenido del estiércol de ganado vacuno para suministrarla al CC.PP. Chochor – Morrope - Lambayeque. 2023.**
58. **Lazaroiu AC, Gmal Osman M, Strejoiu CV, Lazaroiu G. A Comprehensive Overview of Photovoltaic Technologies and their Efficiency for a Climate Neutrality [Internet]. 2023. Available from: <https://www.preprints.org/manuscript/202310.0605/v1> doi:10.20944/preprints202310.0605.v1**
59. **Obaideen K, Olabi AG, Al Swailmeen Y, Shehata N, Abdelkareem MA, Alami AH, et al. Solar Energy: Applications, Trends Analysis, Bibliometric Analysis and Research Contribution to Sustainable Development Goals (SDGs). Sustainability (Switzerland). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2023. doi:10.3390/su15021418**
60. **Ahmad L, Khordehgah N, Malinauskaite J, Jouhara H. Recent advances and applications of solar photovoltaics and thermal technologies. Energy. 2020 Sep 15;207:118254. doi:10.1016/J.ENERGY.2020.118254**

61. **Roa Z, MJ, GS, KF, & GA. GUÍA DE BIOGÁS PARA EL SECTOR PORCÍCOLA EN COLOMBIA. 2020.**
62. **Al-Ezzi AS, Ansari MNM. Photovoltaic Solar Cells: A Review. Applied System Innovation. MDPI; 2022. doi:10.3390/asi5040067**
63. **Ballif C, Haug FJ, Boccard M, Verlinden PJ, Hahn G. Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. Nature Reviews Materials 2022 7:8. 2022 Mar 7;7(8):597–616. doi:10.1038/s41578-022-00423-2**
64. **Kim J, Rabelo M, Padi SP, Yousuf H, Cho EC, Yi J. A review of the degradation of photovoltaic modules for life expectancy. Energies. MDPI AG; 2021. doi:10.3390/en14144278**
65. **Dunlop JP. Batteries and Charge Control in Stand-Alone Photovoltaic Systems: Fundamentals and Application, Publication No. FSEC-CR-1292-01. Sandia National Laboratories. 1997.**
66. **Hao D, Qi L, Tairab AM, Ahmed A, Azam A, Luo D, et al. Solar energy harvesting technologies for PV self-powered applications: A comprehensive review. Renewable Energy. Elsevier Ltd; 2022. p. 678–97. doi:10.1016/j.renene.2022.02.066**
67. **Carlos Robles-Algarín VOODRL. Vista del análisis técnico-económico del rendimiento de los controladores MPPT y PWM en sistemas fotovoltaicos fuera de la red [Internet]. 2022 [cited 2025 Jul 16]. Available from: <https://econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/13567/7033>**
68. **Veilleux G, Potisat T, Pezim D, Ribback C, Ling J, Kryzstofński A, et al. Techno-economic analysis of microgrid projects for rural electrification: A systematic approach to the redesign of Koh Jik off-grid case study. Energy for Sustainable Development. 2020 Feb 1;54:1–13. doi:10.1016/J.ESD.2019.09.007**
69. **Fernandez-Fuentes MH, Eras-Almeida AA, Egado-Aguilera MA. Characterization of technological innovations in photovoltaic rural electrification, based on the experiences of Bolivia, Peru, and Argentina: Third generation solar home systems. Sustainability (Switzerland). MDPI AG; 2021. doi:10.3390/su13063032**
70. **Ponce-Jara MA, Velásquez-Figueroa C, Reyes-Mero M, Rus-Casas C. Performance Comparison between Fixed and Dual-Axis Sun-Tracking Photovoltaic Panels with an IoT Monitoring System in the Coastal Region of Ecuador. Sustainability (Switzerland). 2022 Feb 1;14(3). doi:10.3390/su14031696**
71. **Gimeno-Sales FJ, Orts-Grau S, Escribá-Aparisi A, González-Altozano P, Balbastre-Peralta I, Martínez-Márquez CI, et al. Pv monitoring system for a water pumping scheme with a lithium-ion battery using free open-source**

software and iot technologies. Sustainability (Switzerland). 2020 Dec 2;12(24):1–28. doi:10.3390/su122410651

72. **Mongird K, Viswanathan V, Alam J, Vartanian C, Sprenkle V, Baxter R. 2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment. 2020.**
73. **Mongird K, Fotedar V, Viswanathan V, Koritarov V, Balducci P, Hadjerioua B, et al. Energy Storage Technology and Cost Characterization Report. 2019. Report.**
74. **ENERGY STORAGE. Technology: Lead-Acid Battery. 2025.**
75. **ENERGY STORAGE. Technology: Lithium-Ion Battery. 2025.**
76. **Diorio NA, Freeman JM, Blair N, Diorio N, Freeman J. DC-connected Solar Plus Storage Modeling and Analysis for Behind-The-Meter Systems in the System Advisor Model Preprint Suggested Citation DC-connected Solar Plus Storage Modeling and Analysis for Behind-The-Meter Systems in the System Advisor Model [Internet]. [cited 2026 Feb 20]. Available from: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/71636.pdf>.**
77. **LAZARD LCOE. Table of Contents EXECUTIVE SUMMARY LAZARD'S LEVELIZED COST OF ENERGY ANALYSIS-VERSION 17.0 LAZARD'S LEVELIZED COST OF STORAGE ANALYSIS-VERSION 9.0 LAZARD'S LEVELIZED COST OF HYDROGEN ANALYSIS-VERSION 4.0 APPENDIX LCOE v17.0. 2024.**
78. **Tawalare PK. Optimizing photovoltaic conversion of solar energy. AIP Advances. American Institute of Physics Inc.; 2021. doi:10.1063/5.0064202**
79. **Cai W, Li X, Maleki A, Pourfayaz F, Rosen MA, Alhuyi Nazari M, et al. Optimal sizing and location based on economic parameters for an off-grid application of a hybrid system with photovoltaic, battery and diesel technology. Energy. 2020 Jun 15;201:117480. doi:10.1016/J.ENERGY.2020.117480**
80. **Narendra A, Venkataramana Naik N, Panda AK, Tiwary N. A Comprehensive Review of PV Driven Electrical Motors. Solar Energy. 2020 Jan 1;195:278–303. doi:10.1016/J.SOLENER.2019.09.078**
81. **Mohammed JA. Performance Study of a Modified Sine Wave Inverter [Internet]. [cited 2026 Feb 20]. Available from: [www.pdfactory.com](http://www.pdfactory.com)**
82. **Blooming TM, Asheville EE, Carolina N, Carnovale DJ. APPLICATION OF IEEE STD 519-1992 HARMONIC LIMITS.**
83. **InvertersRus. Go Power GP-ISW1000-12 1000 Watt 12V Pure Sine Inverter [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 20]. Available from: <https://invertersrus.com/product/gopower-gp-sw1000-12/>**

84. El Hammoumi A, Chtita S, Motahhir S, El Ghzizal A. Solar PV energy: From material to use, and the most commonly used techniques to maximize the power output of PV systems: A focus on solar trackers and floating solar panels. *Energy Reports*. Elsevier Ltd; 2022. p. 11992–2010. doi:10.1016/j.egy.2022.09.054
85. U.S DEPARTMENT OF ENERGY. Grid-Connected Renewable Energy Systems | Department of Energy [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 20]. Available from: <https://www.energy.gov/energysaver/grid-connected-renewable-energy-systems>
86. Ramasamy V, Zuboy J, Woodhouse M, O’shaughnessy E, Feldman D, Desai J, et al. U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks, With Minimum Sustainable Price Analysis: Q1 2023 [Internet]. 2050 [cited 2026 Feb 20]. Available from: [www.nrel.gov/publications](http://www.nrel.gov/publications).
87. Vargas G, Gil-Baena Gil S, Figueroa J, Dueñas L. Aprovechamiento de la energía solar para el Área Académica de la Escuela de Aviación Policial mediante un sistema fotovoltaico con conexión a red [Internet]. 2019 [cited 2025 Jul 16]. Available from: <https://www.redalyc.org/journal/5177/517764671004/html/>
88. ENPHASE. To learn more about Enphase offerings, visit [enphase.com](http://enphase.com) Enphase IQ 7X Microinverter. 2019.
89. ENPHASE. To learn more about Enphase offerings, visit [enphase.com](http://enphase.com) Enphase IQ 7X Microinverter. 2019.
90. NASA. National Aeronautics and Space Administration (NASA). POWER Data Services. Climatology point request for ALLSKY\_SFC\_SW\_DWN at Palermo, Huila, Colombia (latitude 2.89167; longitude -75.43750) .
91. NASA. National Aeronautics and Space Administration (NASA). POWER Data Services. Climatology point request for ALLSKY\_SFC\_SW\_DWN at Palermo, Huila, Colombia (latitude 2.89167; longitude -75.43750) [Internet]. [cited 2026 Feb 20]. Available from: [https://power.larc.nasa.gov/api/temporal/climatology/point?parameters=ALLSKY\\_SFC\\_SW\\_DWN&community=RE&longitude=-75.43750&latitude=2.89167&format=JSON](https://power.larc.nasa.gov/api/temporal/climatology/point?parameters=ALLSKY_SFC_SW_DWN&community=RE&longitude=-75.43750&latitude=2.89167&format=JSON)
92. Villamizar DNG, Suárez OMD, Camperos JAG. TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF A PHOTOVOLTAIC SOLAR SYSTEM IN NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA. *Journal of Applied Engineering Science*. 2023;21(1):275–84. doi:10.5937/jaes0-40308
93. Muñoz Y, Carvajal L, Méndez J, Niño J, De la Rosa M, Ospino A. Evaluación técnica y financiera de sistemas solares fotovoltaicos para complejos

residenciales considerando tres diferentes tecnologías comerciales y la política energética de Colombia [Internet]. 2020 [cited 2025 Jul 16]. Available from: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/9981/5730>

94. **Grisales-Noreña LF, Cortés-Caicedo B, Montoya OD, Hernández JC, Alcalá G. A battery energy management system to improve the financial, technical, and environmental indicators of Colombian urban and rural networks. J Energy Storage. 2023 Aug 15;65:107199. doi:10.1016/J.EST.2023.107199**
95. **PVsys. Datos y programa de Meteonorm - Documentación de PVsys [Internet]. [cited 2025 Jul 18]. Available from: <https://www.pvsys.com/help/meteo-database/import-meteo-data/meteonorm-data-and-program/index.html>**
96. **Meteonorm. Introducción - Meteonorm (es) [Internet]. [cited 2025 Jul 18]. Available from: <https://mn8.meteonorm.com/en/>**
97. **Hernández JCB, Moreno C, Ospino-Castro A, Robles-Algarín C, Tobón-Perez J. A hybrid energy solution for the sustainable electricity supply of an irrigation system in a rural area of zona bananera, colombia. International Journal of Energy Economics and Policy. 2021;11(4):521–8. doi:10.32479/ijeep.11014**
98. **West Covina (CA): Concorde Battery Corporation. Concorde Battery Corporation. Battery sizing tips for stand alone PV systems. 2009.**
99. **Pérez NS, Alonso-Montesinos J. Economic and environmental solutions for the PV solar energy potential in Spain. J Clean Prod. 2023 Aug 10;413. doi:10.1016/j.jclepro.2023.137489**
100. **Marcos V. P. Oliveira ALPFFVS dos RHPKMA de SNGJoãoCWACFSF. Technical-Economic Analysis of Photovoltaic Systems Applied to Heterogeneous Mobile Networks in Rural Areas. 2020.**
101. **VILLCAA, VILLCA M. Análisis del costo-beneficio de la instalación de paneles fotovoltaicos en edificios residenciales en Tarragona. 2023.**
102. **de Oliveira Azevêdo R, Rotela P, Souza Rocha LC, Chicco G, Aquila G, Peruchi RS. Identification and analysis of impact factors on the economic feasibility of photovoltaic energy investments. Sustainability (Switzerland). MDPI; 2020. doi:10.3390/su12177173**
103. **IEA. Technology Collaboration Programme by International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme PVPS Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach [Internet]. 2024 [cited 2026 Feb 20]. Available from: [www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)**
104. **International Energy Agency. Technology Collaboration Programme by International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme PVPS**

**Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach [Internet]. 2024 [cited 2026 Feb 20]. Available from: [www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)**

- 105. Yecid Muñoz<sup>1</sup> LHCJPMJCNADLRAO. View of Technical and Financial Assessment of Photovoltaic Solar Systems for Residential Complexes Considering Three Different Commercial Technologies and Colombia's Energy Policy [Internet]. 2020 [cited 2026 Feb 20]. Available from: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/9981/5730>**
- 106. Alvarez YC, Borges RJ, Vidal CDP, Leon FMC, Buendia JSP, Nolasco JAS. Design Improvements and Best Practices in Small-Scale Biodigesters for Sustainable Biogas Production: A Case Study in the Chillón Valley, Perú. Energies (Basel). 2025 Jan 1;18(2). doi:10.3390/en18020338**
- 107. Sevillano CA, Pesantes AA, Peña Carpio E, Martínez EJ, Gómez X. Anaerobic digestion for producing renewable energy—the evolution of this technology in a new uncertain scenario. Entropy. MDPI AG; 2021. p. 1–23. doi:10.3390/e23020145**
- 108. Kalaiselvan N, Glivin G, Bakthavatsalam AK, Mariappan V, Premalatha M, Raveendran PS, et al. A waste to energy technology for Enrichment of biomethane generation: A review on operating parameters, types of biodigesters, solar assisted heating systems, socio economic benefits and challenges. Chemosphere. 2022 Apr 1;293:133486. doi:10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.133486 PubMed PMID: 35016951.**
- 109. Neri A, Bernardi B, Zimbalatti G, Benalia S. An Overview of Anaerobic Digestion of Agricultural By-Products and Food Waste for Biomethane Production. Energies. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2023. doi:10.3390/en16196851**
- 110. Villarroel-Schneider J, Höglund-Isaksson L, Mainali B, Martí-Herrero J, Cardozo E, Malmquist A, et al. Energy self-sufficiency and greenhouse gas emission reductions in Latin American dairy farms through massive implementation of biogas-based solutions. Energy Convers Manag. 2022 Jun 1;261. doi:10.1016/j.enconman.2022.115670**
- 111. Schoeber M, Rahmann G, Freyer B. Small-scale biogas facilities to enhance nutrient flows in rural Africa—relevance, acceptance, and implementation challenges in Ethiopia. Organic Agriculture. 2021 Jun 1;11(2):231–44. doi:10.1007/s13165-020-00329-9**
- 112. Bumharter C, Bolonio D, Amez I, García Martínez MJ, Ortega MF. New opportunities for the European Biogas industry: A review on current installation development, production potentials and yield improvements for manure and agricultural waste mixtures. J Clean Prod. 2023 Feb 15;388:135867. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2023.135867**





113. **Barragán-Escandón A, Ruiz JMO, Tigre JDC, Zalamea-León EF. Assessment of power generation using biogas from landfills in an equatorial tropical context. Sustainability (Switzerland). 2020 Apr 1;12(7). doi:10.3390/su12072669**
114. **Montalvo S, Martínez J, Castillo A, Huiliñir C, Borja R, García V, et al. Sustainable energy for a winery through biogas production and its utilization: A Chilean case study. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2020 Feb 1;37. doi:10.1016/j.seta.2020.100640**
115. **Marques Lameirinhas RA, Torres JPN, de Melo Cunha JP. A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications. Energies. MDPI; 2022. doi:10.3390/en15051823**
116. **Izam NSMN, Itam Z, Sing WL, Syamsir A. Sustainable Development Perspectives of Solar Energy Technologies with Focus on Solar Photovoltaic—A Review. Energies. MDPI; 2022. doi:10.3390/en15082790**
117. **Rocha-Meneses L, Luna-delRisco M, González CA, Moncada SV, Moreno A, Sierra-Del Rio J, et al. An Overview of the Socio-Economic, Technological, and Environmental Opportunities and Challenges for Renewable Energy Generation from Residual Biomass: A Case Study of Biogas Production in Colombia. Energies. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2023. doi:10.3390/en16165901**
118. **Tavera-Ruiz C, Martí-Herrero J, Mendieta O, Jaimes-Estévez J, Gauthier-Maradei P, Azimov U, et al. Current understanding and perspectives on anaerobic digestion in developing countries: Colombia case study. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023 Mar 1;173:113097. doi:10.1016/J.RSER.2022.113097**
119. **Contreras MD, Barros RS, Zapata J, Chamorro MV, Arrieta AA. A look to the biogas generation from organic wastes in Colombia. International Journal of Energy Economics and Policy. 2020;10(5):248–54. doi:10.32479/ijeep.9639**
120. **Presta-Novello D, Salazar-Camacho NA, Delgadillo-Mirquez L, Hernández-Sarabia HM, Álvarez-Bustos M del P. Sustainable Development in the Colombian Post-Conflict—The Impact of Renewable Energies in Coffee-Growing Women. Sustainability (Switzerland) . 2023 Jan 1;15(2). doi:10.3390/su15021618**
121. **Mosquera AM, Delgado JM, Ramón AA, Vásquez JE, Peñuela M. Evaluation of Biogas Production from Swine Manure Using a UASB Reactor (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) with Long-Term Operation. Energies . 2024 Jun 1;17(11). doi:10.3390/en17112723**
122. **Amado M, Barca C, Hernández MA, Ferrasse JH. Evaluation of Energy Recovery Potential by Anaerobic Digestion and Dark Fermentation of Residual**

**Biomass in Colombia. Front Energy Res. 2021 Jun 18;9.  
doi:10.3389/fenrg.2021.690161**

123. **Eras-Almeida AA, Vásquez-Hernández T, Hurtado-Moncada MJ, Egidio-Aguilera MA. A Comprehensive Evaluation of Off-Grid Photovoltaic Experiences in Non-Interconnected Zones of Colombia: Integrating a Sustainable Perspective. Energies (Basel). 2023 Mar 1;16(5).  
doi:10.3390/en16052292**
124. **Blasnilo Rúa Ramirez E, Silvello A, Cano Cano IG, Guillermo Moreno G. SOCIOECONOMIC IMPACT ASSESSMENT AND EMPOWERMENT OF SOLAR PHOTOVOLTAIC PROJECTS FOR AUTONOMOUS HOMES IN COLOMBIA [Internet]. 2023 Aug. Report. Available from:  
<https://www.researchgate.net/publication/373714533>**
125. **Rocha CMM, Pérez DF, Retamoza JR, Ortega JS, Bohórquez DB, Catalan LT. Evaluation, Hierarchy and Selection of the best Source of Energy by using AHP, as a Proposed Solution to an Energy and Socio-economic Problem, in the case of Colombia's Pacific Zone. International Journal of Energy Economics and Policy. 2022 Sep 27;12(5):409–19. doi:10.32479/ijep.13448**
126. **Perez J, Díaz Andrés. Methodology to Assess the Implementation of Solar Power Projects in Rural Areas Using AHP: a Case Study of Colombia. 2020.**
127. **Sunny btc Solar. The Ultimate Guide To Mounting Solar Panels On A Tile Roof | BTCSOLAR [Internet]. 2025 [cited 2025 Sep 27]. Available from:  
[https://www.btc-solar.com/news/the-ultimate-guide-to-mounting-solar-panels-on-a-tile-roof/?utm\\_source](https://www.btc-solar.com/news/the-ultimate-guide-to-mounting-solar-panels-on-a-tile-roof/?utm_source)**
128. **Alcaldía de Palermo - Huila. INFORMACIÓN DEL MUNICIPIO [Internet]. [cited 2025 Jul 18]. Available from: <https://www.palermo-huila.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>**
129. **Alcaldía de Palermo - Huila. ECONOMÍA DEL MUNICIPIO [Internet]. [cited 2025 Jul 18]. Available from: <https://www.palermo-huila.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Economia.aspx>**
130. **Mercado Libre. Impulsor Eléctrico 200km Cercas Del Oriente | MercadoLibre [Internet]. [cited 2025 Jul 18]. Available from:  
[https://www.mercadolibre.com.co/impulsor-electrico-200km-cercas-del-oriente/up/MCOU2428577177?pdp\\_filters=item\\_id:MCO515241960](https://www.mercadolibre.com.co/impulsor-electrico-200km-cercas-del-oriente/up/MCOU2428577177?pdp_filters=item_id:MCO515241960)**
131. **Control Ganadero. Báscula Ganadera Electrónica Portátil Elite 3.000. Bluetooth [Internet]. [cited 2025 Jul 18]. Available from:  
[https://www.tienda.controlganadero.com.co/MCO-2732668714-bascula-ganadera-electronica-portatil-elite-3000-bluetooth-\\_JM](https://www.tienda.controlganadero.com.co/MCO-2732668714-bascula-ganadera-electronica-portatil-elite-3000-bluetooth-_JM)**

132. de Ordeño. Equipos de ordeño con conexión a establo movil o fijo - SUPLAGRO [Internet]. [cited 2025 Jul 18]. Available from: <https://www.xn--deordeo-9za.com/equipos-portatiles/conexion-a-establo/>
133. Fajobi MO, Lasode OA, Adeleke AA, Ikubanni PP, Balogun AO. Investigation of physicochemical characteristics of selected lignocellulose biomass. *Sci Rep.* 2022 Dec 1;12(1). doi:10.1038/s41598-022-07061-2 PubMed PMID: 35190666.
134. Maj I. Significance and Challenges of Poultry Litter and Cattle Manure as Sustainable Fuels: A Review. *Energies.* MDPI; 2022. doi:10.3390/en15238981
135. Marin-Batista JD, Villamil JA, Qaramaleki S V., Coronella CJ, Mohedano AF, Rubia MA de la. Energy valorization of cow manure by hydrothermal carbonization and anaerobic digestion. *Renew Energy.* 2020 Nov 1;160:623–32. doi:10.1016/J.RENENE.2020.07.003
136. Jeppu GP, Janardhan J, Kaup S, Janardhanan A, Mohammed S, Acharya S. Effect of feed slurry dilution and total solids on specific biogas production by anaerobic digestion in batch and semi-batch reactors. *J Mater Cycles Waste Manag.* 2022 Jan 1;24(1):97–110. doi:10.1007/s10163-021-01298-1
137. ANERN STORE. How to run a structural load analysis for rooftop PV racking [Internet]. [cited 2026 Feb 21]. Available from: <https://www.anernstore.com/blogs/diy-solar-guides/pv-racking-roof-load-analysis>
138. De La Comisión S. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial Dirección del Sistema Habitacional República de Colombia COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES (Creada....
139. Ramos LR, Lovato G, Rodrigues JAD, Silva EL. Scale-up and energy estimations of single- and two-stage vinasse anaerobic digestion systems for hydrogen and methane production. *J Clean Prod.* 2022 May 15;349:131459. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2022.131459
140. Distriladam. Plástico para Biodigestor – Distriladam [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 21]. Available from: <https://distriladam.com/product/plastico-para-biodigestor/>
141. Ciula J, Kowalski S, Generowicz A, Barbusiński K, Matuszak Z, Gaska K. Analysis of Energy Generation Efficiency and Reliability of a Cogeneration Unit Powered by Biogas. *Energies (Basel).* 2023 Mar 1;16(5). doi:10.3390/en16052180
142. MADE IN CHINA. Biogas Generator 1kw (DF1500BG) - Biogas Generator and Generator [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 21]. Available from:

<https://www.made-in-china.com/showroom/tanbill88/product-detailDMoJhYTHaekr/China-Biogas-Generator-1kw-DF1500BG-.html>

143. Soledad Torres-Calderón MJPPBPQ. Adsorción de sulfuro de hidrógeno del biogás mediante virutas de hierro pretratadas para su reaprovechamiento energético. 2020.
144. GREEN EMPOWERMENT. Green Empowerment Tubular Biogas Digester Manual TUBULAR BIOGAS DIGESTER MANUAL • Family Biodigesters: Design Guide and Installation Manual Version 1 by Jaime Martí Herrero (Biodigestores Familiares: Guía de Diseño y Manual de Instalación Versión 1 de Ja....
145. SUPLAGRO. Equipo de Ordeño Twin Car  - 1 y 2 puestos Linea Premium + OBSEQUIOS + PAGUE AL RECIBIR  - SUPLAGRO [Internet]. 2025 [cited 2025 Sep 27]. Available from: [https://suplagro.com/twin-car/?utm\\_sourceE](https://suplagro.com/twin-car/?utm_sourceE)
146. MERCADO LIBRE. Impulsor Electrico 50km Cercas Del Oriente | Cuotas sin interés [Internet]. 2025 [cited 2025 Sep 27]. Available from: [https://www.mercadolibre.com.co/impulsor-electrico-50km-cercas-del-oriente/up/MCOU2433394960?pdp\\_filters=item\\_id:MCO515241984#is\\_advertising=true&searchVariation=MCOU2433394960&backend\\_model=search-backend&position=1&search\\_layout=stack&type=pad&tracking\\_id=af33c71f-8839-4108-a46f-1b1be50fe0cb](https://www.mercadolibre.com.co/impulsor-electrico-50km-cercas-del-oriente/up/MCOU2433394960?pdp_filters=item_id:MCO515241984#is_advertising=true&searchVariation=MCOU2433394960&backend_model=search-backend&position=1&search_layout=stack&type=pad&tracking_id=af33c71f-8839-4108-a46f-1b1be50fe0cb)
147. MERCADO LIBRE. Bascula Ganadera Bbg Negro | Cuotas sin interés [Internet]. 2025 [cited 2025 Sep 27]. Available from: [https://www.mercadolibre.com.co/bascula-ganadera-bbg/up/MCOU2436153742?pdp\\_filters=item\\_id:MCO847653826](https://www.mercadolibre.com.co/bascula-ganadera-bbg/up/MCOU2436153742?pdp_filters=item_id:MCO847653826)
148. IDEAGRO. Ideagro | Silo Pack [Internet]. 2025 [cited 2025 Sep 27]. Available from: [https://www.ideagro.com/en/silo-pack-j-401?utm\\_source](https://www.ideagro.com/en/silo-pack-j-401?utm_source)
149. MERCADO LIBRE. Desinfectante | MercadoLibre  [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 21]. Available from: <https://listado.mercadolibre.com.co/desinfectante>
150. MAS FILTROS LP. Filtro para bomba de vacío | Más Filtros LP | Elementos-Separadores  [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 21]. Available from: <https://masfiltroslp.co/product/filtro-para-bomba-de-vacio/>
151. MERCADO LIBRE. Aceite Transmisión Mecánica Havoline 75w90 | Cuotas sin interés [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 21]. Available from: [https://www.mercadolibre.com.co/aceite-transmision-mecanica-havoline-75w90/up/MCOU2437914042#polycard\\_client=search-](https://www.mercadolibre.com.co/aceite-transmision-mecanica-havoline-75w90/up/MCOU2437914042#polycard_client=search-)
152. MERCADO LIBRE. Aislador Para Cerca Electrica W Lhaura X 25 Unidades | Cuotas sin interés [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 21]. Available from:

[https://www.mercadolibre.com.co/aislador-para-cerca-electrica-w-lhaura-x-25-unidades/up/MCOU2474093400#polycard\\_client=search-nordic&search\\_layout=grid&position=22&type=product&tracking\\_id=4ccd7037-3881-4fa8-a182-052f23ffdd43&wid=MCO1210694389&sid=search](https://www.mercadolibre.com.co/aislador-para-cerca-electrica-w-lhaura-x-25-unidades/up/MCOU2474093400#polycard_client=search-nordic&search_layout=grid&position=22&type=product&tracking_id=4ccd7037-3881-4fa8-a182-052f23ffdd43&wid=MCO1210694389&sid=search)

153. METROCERT. Calibración Acreditada Balanzas y Básculas - METROCERT S.A.S [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 21]. Available from: [https://www.metrocert.com.co/producto/calibracion-acreditada-masa/?utm\\_](https://www.metrocert.com.co/producto/calibracion-acreditada-masa/?utm_)
154. JINKO SOLAR. Installation Manual A1. Report.
155. New Energy G. Installation & Operation Manual Download Manual [Internet]. [cited 2026 Feb 21]. Available from: [www.ginverter.com](http://www.ginverter.com)
156. Solarix. Mantenimiento preventivo y/o correctivo de tu instalación fotovoltaica - Solarix [Internet]. [cited 2026 Feb 21]. Available from: <https://www.solarix.es/blog/mantenimiento-instalacion-fotovoltaica/>
157. HOMECENTER. Tubo Sanitario 6' X 6 Metros - Homecenter.com.co [Internet]. 2025 [cited 2025 Sep 27]. Available from: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/65855/tubo-sanitario-6-x-6-metros/65855/>
158. HOMECENTER. Tubo Presión 1/2X6 Mts. 9-500 Psi - Homecenter.com.co [Internet]. 2025 [cited 2025 Sep 27]. Available from: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/65891/tubo-presion-1-2x6-mts-9-500-psi/65891/>
159. HOMECENTER. Arena de Rio 40kg - Homecenter.com.co [Internet]. 2025 [cited 2025 Sep 27]. Available from: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/297067/arena-de-rio-40kg/297067/>
160. HOMECENTER. Cemento Gris Alion Uso General 50kg - Homecenter.com.co [Internet]. 2025 [cited 2025 Sep 27]. Available from: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/454080/cemento-gris-alion-uso-general-50kg/454080/>
161. BIOGAS. Desulfurización de humo mojada del equipo 10ppm de la purificación del biogás de H<sub>2</sub>S [Internet]. 2025 [cited 2025 Sep 27]. Available from: <https://spanish.biogas-projects.com/sale-21480646-h2s-biogas-purification-equipment-10ppm-wet-flue-gas-desulfurization.html>
162. HELPSAVENATURE. Costos de la energía de biomasa: Ayude a salvar la naturaleza [Internet]. 2025 [cited 2025 Sep 27]. Available from: <https://helpsavenature.com/biomass-energy-costs>