

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

FACULTAD DE INGENIERÍA



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN
ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS PARA EL
SUMINISTRO ELÉCTRICO DEL FUNDO NUEVO MUNDO,
IMAZA – AMAZONAS**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**Autores: Bach. Pedro Eli Omar Flores Ramirez
Bach. Jairo Uriarte Fernández**

Asesor: Dr. José Andrés Fernández

Línea de investigación: Eficiencia energética

JAÉN – PERÚ

2025

Pedro Eli Omar Flores Ramirez Jairo Uriarte Fernán...

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS PARA EL SUMINISTRO ELÉCTRICO DEL F...

 Quick Submit

 Quick Submit

 Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3385175295

125 páginas

Fecha de entrega

24 oct 2025, 12:17 p.m. GMT-5

36.091 palabras

Fecha de descarga

24 oct 2025, 12:23 p.m. GMT-5

192.163 caracteres

Nombre del archivo

ndez_Pedro_Eli_Omar_Flores_Ramirez_-_JAIRO_URIA RTE_FERNANDEZ.pdf

Tamaño del archivo

3.6 MB

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAEN



Dr. Alexander Huamán Mera
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería




1% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dr. Alexander Huamán Mera
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería



FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día miércoles 12 de noviembre del 2025, siendo las 17:30 horas, se reunieron los integrantes del Jurado:

Presidente : Dr. Edwin Carlos Lenin Felix Poicon
Secretario : Mg. Juan Antonio Labrin Romero
Vocal : Mtro. Marco Luis Pérez Silva

Para evaluar la Sustentación del Informe Final:

- () Trabajo de Investigación
(X) Tesis
() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: "PROPUESTA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS PARA EL SUMINISTRO ELÉCTRICO DEL FUNDO NUEVO MUNDO, IMAZA - AMAZONAS".

Presentado por los bachilleres: **Pedro Eli Omar Flores Ramirez y Jairo Uriarte Fernández**, de la Escuela Profesional de INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA.


Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

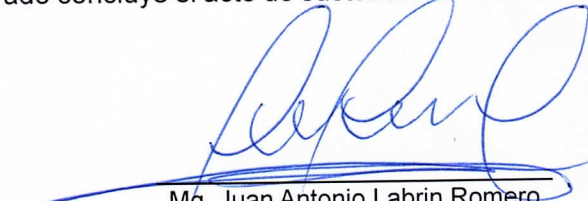
- (X) Aprobar () Desaprobar (X) Unanimidad () Mayoría

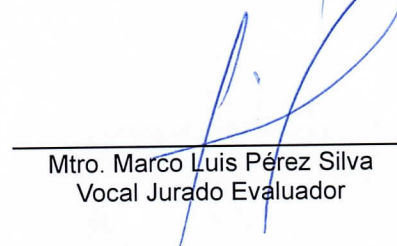
Con la siguiente mención:

- | | | |
|----------------|------------|--------|
| a) Excelente | 18, 19 20 | () |
| b) Muy bueno | 16, 17 | (16) |
| c) Bueno | 14, 15 | () |
| d) Regular | 13 | () |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | () |

Siendo las 18:00 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando con la suscripción de la presente.


Dr. Edwin Carlos Lenin Felix Poicon
Presidente Jurado Evaluador


Mg. Juan Antonio Labrin Romero
Secretario Jurado Evaluador


Mtro. Marco Luis Pérez Silva
Vocal Jurado Evaluador

“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

ANEXO N°06:

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)

Nosotros, **Bach. Jairo Uriarte Fernández y Bach. Pedro Eli Omar Flores Ramirez**, egresados de la carrera Profesional de **Ingeniería Mecánica y Eléctrica** de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén, identificados con **DNI: 73672291 y DNI: 72001872**.

Declaro bajo juramento que:

1. Somos Autores del trabajo titulado:

“PROPUESTA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS PARA EL SUMINISTRO ELÉCTRICO DEL FUNDO NUEVO MUNDO, IMAZA – AMAZONAS”.

Asesorado por el **Dr. José Andrés Fernández Mera**.

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar; el Título Profesional/Grado Académico de Ingeniero Mecánico Electricista.

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén 20 de diciembre del 2025.



Bach. Jairo Uriarte Fernández
DNI: 73672291



Bach. Pedro Eli Omar Flores Ramirez
DNI: 72001872



ÍNDICE

CARÁTULA	I
ÍNDICE	II
ÍNDICE DE TABLAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT	VII
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MATERIAL Y MÉTODOS	12
2.1. Ubicación del área de estudio	12
2.1.1. Ubicación geográfica	12
2.2. Materiales	13
2.3. Población, muestra y muestreo	13
2.3.1. Población.....	13
2.3.2. Muestra	13
2.4. Método.....	14
2.4.1. Diseño	14
2.4.2. Alcance de la investigación	15
2.4.3. Técnicas	21
2.4.4. Procedimiento	23
III. RESULTADOS.....	25
3.1. Evaluar el requerimiento energético del Fundo Nuevo Mundo mediante inventario de cargas, estimando potencia instalada (kW), demanda máxima (kW), energía diaria (kWh/día) y perfil horario	25
3.2. Cuantificar el volumen de estiércol generado por el ganado vacuno del Fundo Nuevo Mundo mediante censo por categoría (toros y vacas) y aplicación del 6 % del peso vivo como tasa diaria de excreción, obteniendo la producción total (kg/día) y la fracción aprovechable según tiempo de permanencia en corral (25 %) y pérdidas de recolección (7.5 %)......	26
3.3. Diseñar el sistema integrado de biodigestión y generación eléctrica del Fundo Nuevo Mundo, seleccionando el biodigestor mediante matriz de criterios; definir los parámetros de proceso, estimar la producción de biogás, especificar el acondicionamiento del gas, dimensionar presiones de operación del digestor, y seleccionar el grupo electrógeno con sus especificaciones e integración eléctrica.....	28

3.3.1. Cálculo de la producción de biogás a partir de estiércol bovino	28
3.3.2. Biodigestor.....	44
3.3.3. Selección del tipo de biodigestor	55
3.3.4. Componentes del sistema de biodigestor seleccionado	62
3.4. Evaluar la viabilidad económica de la generación eléctrica con biogás del sistema diseñado, construyendo el flujo de caja a 10 años a partir del CAPEX del sistema (presupuesto detallado), los ingresos por ahorro frente a la alternativa convencional y los OPEX anuales (operación y mantenimiento), y calculando los indicadores VAN y TIR.	85
3.4.1. Costos de instalación inicial de la propuesta	85
3.4.2. Ingresos	88
3.4.3. Egresos	92
3.4.4. VAN y TIR	92
IV. DISCUSIÓN	95
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
VI. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS	100
AGRADECIMIENTO.....	110
DEDICATORIA.....	111
ANEXOS.....	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Check list normativo del sistema propuesto</i>	18
Tabla 2 <i>Indicadores vinculados a ODS (fórmulas, línea base y meta)</i>	19
Tabla 3 <i>Potencia instalada y consumo energético diario de equipos eléctricos en el Fundo Nuevo Mundo</i>	25
Tabla 4 <i>Producción diaria de estiércol de ganado vacuno según categoría</i>	27
Tabla 5 <i>Relación entre temperatura de funcionamiento y TRH recomendado en digestión anaerobia</i>	28
Tabla 6 <i>Comparación de modelos de biodigestores continuos: domo flotante, domo fijo y estructura flexible</i>	51
Tabla 7 <i>Ventajas y desventajas del biodigestor discontinuo</i>	53
Tabla 8 <i>Comparación entre biodigestores continuos y discontinuos</i>	54
Tabla 9.....	57
Tabla 10 <i>Matriz de enfrentamiento de criterios</i>	59
Tabla 11 <i>Matriz de evaluación ponderada de criterios para la selección del biodigestor</i>	61
Tabla 12 <i>Dimensiones de zanja recomendadas para modelos de Biobolsa</i>	63
Tabla 13 <i>Presiones internas máximas de operación de biodigestor</i>	75
Tabla 14 <i>Especificaciones técnicas del generador a biogás seleccionado</i>	78
Tabla 15 <i>Curva de consumo de biogás del grupo electrógeno</i>	79
Tabla 16 <i>Programa referencial de operación del grupo electrógeno</i>	80
Tabla 17 <i>Presupuesto detallado del sistema de biodigestión</i>	85
Tabla 18 <i>Egresos considerados en el flujo</i>	92
Tabla 19 <i>Cálculo de VAN y TIR</i>	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Distrito de Imaza</i>	12
Figura 2 <i>Esquema de un biodigestor continuo para la producción de biogás</i>	46
Figura 3 <i>Esquema de un biodigestor de campana flotante (modelo indio)</i>	48
Figura 4 <i>Esquema de un biodigestor de tapa fija (modelo chino)</i>	49
Figura 5 <i>Esquema de un biodigestor de estructura flexible</i>	50
Figura 6 <i>Biodigestor tubular Sistema Biobolsa</i>	65
Figura 7 <i>Contribución de los biodigestores Biobolsa al cumplimiento de los ODS</i>	66
Figura 8 <i>Filtro de biogás (H₂S)</i>	70
Figura 9 <i>Generador de biogás de pequeño tamaño para digestor</i>	77
Figura 10 <i>Curva %carga – consumo de biogás del generador (3 kW)</i>	79

RESUMEN

En el Fundo Nuevo Mundo (Imaza–Amazonas) se propone valorizar el estiércol bovino para producir biogás y generar electricidad, asegurando suministro continuo y reducción de costos e impactos; estudio aplicado y descriptivo-proyectivo; se auditó la demanda (2.26 kW instalados; 5.72 kWh/día), se censó el conjunto de ganado (64 reses) y se dimensionó un biodigestor tubular Biobolsa BB30 con TRH = 20 días y dilución 1:2; la selección tecnológica se realizó con matriz de criterios, y el grupo electrógeno de 3 kW se definió por la curva carga–consumo; la evaluación económica consideró horizonte = 10 años y tasa de descuento = 10 %, incorporando CAPEX y OPEX; se estimó una producción de 16.9 m³/d de biogás (25–30 kWh/d), suficiente para cubrir la demanda actual; con estos supuestos, los indicadores fueron: VAN = S/ 3,273.95 y TIR = 12.43 %, confirmando viabilidad; la solución aporta continuidad del servicio, reduce la dependencia de diésel y genera digestato utilizable como biofertilizante; en conclusión, el sistema propuesto es técnica y económicamente factible para contextos rurales amazónicos, con potencial de réplica y escalamiento comunitario, condicionado a capacitación operativa y mantenimiento preventivo, además de una gestión adecuada de seguridad e higiene en el manejo del digestor y del gas.

Palabras clave: biogás, biodigestor tubular, generación eléctrica, viabilidad económica, sostenibilidad.

ABSTRACT

At Fundo Nuevo Mundo (Imaza–Amazonas), it is proposed to valorize bovine manure to produce biogas and generate electricity, ensuring a continuous supply and reducing costs and impacts. An applied and descriptive-projective study was carried out. Demand was audited (2.26 kW installed; 5.72 kWh/day), the livestock population was censused (64 cattle), and a Biobolsa BB30 tubular biodigester was sized with a HRT of 20 days and a 1:2 dilution. Technology selection was carried out using a criteria matrix, and the 3kW generator set was defined by the load–consumption curve. The economic evaluation considered a 10 year horizon and a 10% discount rate, incorporating CAPEX and OPEX. Biogas production was estimated at 16.9 m³/d (25–30 kWh/d), sufficient to cover current demand. Under these assumptions, the indicators were: NPV = S/ 3,273.95 and IRR = 12.43%, confirming viability. The solution provides service continuity, reduces dependence on diesel, and generates digestate usable as biofertilizer. In conclusion, the proposed system is technically and economically feasible for rural Amazonian contexts, with potential for community replication and scaling, subject to operational training and preventive maintenance, in addition to adequate safety and hygiene management in the handling of the digester and gas.

Keywords: biogas, tubular biodigester, electricity generation, economic viability, sustainability.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel internacional, en India, la adopción de sistemas de generación eléctrica a partir de biogás enfrenta varios desafíos debido a la falta de infraestructura adecuada y los altos costos iniciales asociados con la implementación de estas tecnologías. Aunque el país tiene un gran potencial para la producción de biogás debido a su extensa agricultura y residuos orgánicos, la falta de políticas coherentes y la dificultad para integrar esta fuente de energía a las redes eléctricas existentes limitan su expansión. Además, la falta de capacitación y recursos financieros adecuados para los pequeños productores agrarios también impide que el biogás se convierta en una solución viable a gran escala (Bandgar et al., 2021).

En Alemania, uno de los líderes en energía renovable, el uso de biogás como fuente de generación eléctrica se enfrenta a obstáculos debido a las estrictas normativas medioambientales y la saturación del mercado. Aunque el país ha invertido fuertemente en biogás, las políticas regulatorias y los incentivos financieros limitan la expansión de nuevas plantas a gran escala. Las políticas gubernamentales favorecen más a las fuentes de energía solar y eólica, lo que pone al biogás en una posición secundaria a pesar de sus beneficios en términos de gestión de residuos y reducción de gases de efecto invernadero (Mustafi y Agarwal, 2020).

En Brasil, el uso de biogás para la generación de electricidad se ve afectado por la insuficiente infraestructura para la gestión de residuos orgánicos, lo que dificulta la producción eficiente de biogás a gran escala. A pesar de contar con una gran cantidad de residuos agrícolas y orgánicos, la falta de tecnologías adecuadas y de inversión en investigación para optimizar la producción de biogás limita su implementación en el sector energético. La falta de incentivos gubernamentales y de una política de apoyo sólido también contribuye a que el biogás no se aproveche al máximo en el país (Pavan et al., 2021).

En Perú, el uso del biogás como fuente de energía para la generación eléctrica enfrenta dificultades debido a la falta de infraestructura adecuada para su producción y distribución. Aunque el país tiene un notable potencial para la generación de biogás, especialmente por su gran actividad agrícola y ganadera, la ausencia de una infraestructura eficiente para recolectar y procesar los residuos orgánicos limita significativamente la capacidad de generar energía a partir de esta fuente renovable. Además, las políticas gubernamentales en torno al biogás no están lo suficientemente desarrolladas o implementadas para fomentar su adopción masiva, lo que impide que esta tecnología sea competitiva frente a otras fuentes de energía más convencionales (Saravia et al., 2024).

A pesar de que Perú presenta una gran cantidad de recursos naturales que podrían aprovecharse para la generación de biogás, uno de los problemas más grandes es la baja conciencia ambiental en las zonas rurales y la falta de capacitación técnica adecuada. La mayoría de los productores agrícolas y ganaderos en el país desconocen los beneficios del biogás y cómo pueden implementarlo para mejorar su eficiencia energética y reducir sus costos operativos. Sin programas de formación que enseñen sobre la importancia de la gestión de residuos orgánicos y su conversión en energía, la adopción de esta tecnología permanece en un nivel bajo, lo que obstaculiza su expansión (Beraún-Espíritu et al., 2023).

Otro de los principales obstáculos en Perú para el desarrollo de sistemas de generación eléctrica a partir de biogás es la falta de acceso a financiamiento para las pequeñas y medianas empresas, así como para los agricultores locales. El costo inicial para la instalación de tecnologías de biogás, como biodigestores y plantas de tratamiento, resulta prohibitivo para muchas de las pequeñas comunidades rurales, que no tienen acceso a créditos o subsidios adecuados. La falta de políticas claras que fomenten la inversión en energías renovables y la ausencia de incentivos fiscales han reducido significativamente las oportunidades para que el biogás se convierta en una fuente de energía accesible para más sectores de la población (Noriega, 2023).

En el Fundo Nuevo Mundo en Imaza-Amazonas, la implementación de un sistema de generación eléctrica a partir de biogás para el suministro energético enfrenta diversas dificultades; en esta región, donde la infraestructura eléctrica es limitada y la dependencia de fuentes de energía no renovables es alta, la falta de acceso a una red eléctrica estable y de tecnologías adecuadas para la generación de biogás dificulta la adopción de soluciones energéticas sostenibles; a pesar del potencial agrícola y de residuos orgánicos en la zona, las condiciones actuales no permiten aprovechar esta fuente de energía de manera eficiente y sostenible, lo que afecta la calidad de vida de los habitantes y limita el desarrollo económico.

En el Fundo Nuevo Mundo se registra una demanda mínima de 5.72 kWh/día y 2.26 kW de potencia instalada; al no contar con un suministro continuo, esa demanda constituye un déficit energético diario efectivo de 5.72 kWh; si dicho faltante se cubriera con un grupo electrógeno diésel de pequeña escala (consumo típico 0.30–0.40 L/kWh), el gasto directo ascendería a S/ 23–30 por día (suponiendo S/ 12–16/L), es decir S/ 8,400–10,900 por año; en términos ambientales, ese mismo faltante implicaría 0.8–1.1 kg CO₂ por kWh (factor de emisión 2.6–2.8 kg CO₂/L), lo que equivale a 4.6–6.3 kg CO₂/día y 1.7–2.3 t CO₂/año solo para cubrir la demanda mínima actual; estas magnitudes evidencian que la brecha local no es solo de acceso

a energía, sino también económica (alto costo operativo para suplencia fósil) y ambiental (emisiones evitables), reforzando la pertinencia de una solución basada en biogás.

Las principales causas de esta problemática son la escasa infraestructura eléctrica en la región, sumada a la falta de inversión en energías renovables y biogás; la región de Imaza presenta desafíos logísticos y geográficos que dificultan el acceso a tecnologías especializadas y equipos necesarios para la producción de biogás; además, la ausencia de políticas públicas que promuevan el uso de energías limpias y la falta de capacitación en la comunidad sobre los beneficios y el manejo del biogás agravan la situación; la escasez de recursos económicos para financiar estos proyectos también limita su viabilidad, tanto para los pequeños productores como para las autoridades locales.

Las consecuencias de no abordar esta problemática son diversas y afectan tanto al bienestar de la población como al entorno local; la falta de acceso a energía eléctrica estable limita las actividades productivas, impide el acceso a servicios básicos como la educación y la salud, y fomenta la dependencia de fuentes de energía contaminantes, como los combustibles fósiles; además, la no implementación de un sistema de biogás implica una oportunidad perdida para el manejo adecuado de residuos orgánicos, lo que contribuye a la degradación ambiental; a largo plazo, la región podría quedar rezagada en términos de desarrollo económico y sostenible, afectando la calidad de vida de los habitantes del Fundo Nuevo Mundo y la conservación del entorno natural de la zona.

Tomando como punto de partida el análisis de la problemática identificada en el presente estudio, resultó necesario orientar la investigación hacia una cuestión central que permitiera guiar el proceso de indagación de manera coherente y fundamentada; en este sentido, se planteó una interrogante de carácter principal que busca sintetizar las preocupaciones esenciales del problema y, al mismo tiempo, delimitar el rumbo metodológico a seguir; dicha formulación no solo responde a la necesidad de esclarecer la situación problemática, sino que también constituye un eje articulador para el desarrollo de los objetivos específicos y la contrastación de hipótesis, asegurando así la pertinencia y la rigurosidad académica de la investigación: ¿Cómo puede un sistema de generación eléctrica a partir de biogás contribuir al suministro energético sostenible en el Fundo Nuevo Mundo, Imaza – Amazonas?

Este estudio se justifica técnicamente debido a la disponibilidad de recursos orgánicos locales que pueden ser aprovechados eficientemente para la producción de biogás. La región cuenta con una actividad agrícola y ganadera significativa, lo que genera grandes volúmenes de residuos orgánicos, como estiércol y restos de cultivos, que son ideales para la producción de

biogás mediante procesos de digestión anaeróbica. Además, la tecnología para la generación de biogás es accesible y adecuada para ser implementada en áreas rurales, contribuyendo a la diversificación energética y a la mejora de la infraestructura local sin la necesidad de complejas inversiones en redes eléctricas extensas.

Desde una perspectiva económica, la implementación de un sistema de biogás en el Fundo Nuevo Mundo representa una oportunidad para reducir los costos energéticos a largo plazo. Actualmente, muchas de las zonas rurales en la región de Imaza dependen de fuentes de energía no renovables, lo que genera gastos constantes y poco sostenibles. Con la generación de energía a partir de biogás, se puede disminuir la dependencia de combustibles fósiles o energía importada, promoviendo una autonomía energética y reduciendo los costos operativos en actividades productivas como la agricultura y la ganadería. Además, el sistema propuesto podría generar ingresos adicionales mediante la venta de energía excedente o de subproductos como el fertilizante orgánico, mejorando así la economía local.

Socialmente, la propuesta tiene un gran impacto en la mejora de la calidad de vida de los habitantes del Fundo Nuevo Mundo. La generación local de energía eléctrica a partir de biogás permitiría la electrificación de viviendas, mejorando el acceso a servicios básicos como la iluminación, la comunicación, y el acceso a la educación y la salud. La implementación de este sistema también fomentaría la participación comunitaria, ya que los habitantes podrían involucrarse en la gestión y mantenimiento de la planta de biogás, generando empleo y fortaleciendo el sentido de comunidad. De esta manera, se contribuye a la inclusión social y a la reducción de la brecha energética en zonas rurales aisladas.

Desde el punto de vista ambiental, la propuesta de un sistema de biogás es una solución altamente beneficiosa para el entorno natural del Fundo Nuevo Mundo. El aprovechamiento de los residuos orgánicos para generar energía limpia evitaría su acumulación y posterior descomposición en vertederos, lo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente metano, un gas altamente contaminante. Además, el uso de biogás contribuiría a la preservación de los recursos naturales al disminuir la necesidad de talar árboles o utilizar fuentes de energía contaminantes como el petróleo o el gas. Este sistema también permitiría el reciclaje de los subproductos orgánicos en forma de fertilizantes, promoviendo la sostenibilidad en la actividad agrícola y reduciendo la dependencia de productos químicos.

En cuanto a los antecedentes internacionales Kadam et al. (2024) analizaron la co-digestión de estiércoles pecuarios como estrategia de gestión sostenible de residuos con un enfoque revisión narrativa/sistemática; entre sus resultados la co-digestión mejora la estabilidad

(amortigua NH_3 , balancea C/N), aumenta rendimientos frente a mono-digestión y reduce inhibiciones; reporta rangos típicos de operación y brechas (control de H_2S , manejo del digestato, escalamiento); concluyendo que para unidades de pequeña escala, la selección de co-sustratos ricos en carbono y el control operacional (TRH, carga orgánica) son determinantes para sostener eficiencia eléctrica y cobeneficios ambientales.

Zhou et al. (2024) propusieron un método de dimensionamiento de capacidad para sistemas rurales de generación eléctrica con biogás que operan en forma independiente bajo incertidumbre fuente-carga; enfoque modelación/optimización; diseño metodológico con estudio de caso; entre sus resultados el método captura la variabilidad de la demanda y permite seleccionar capacidades que cumplen el nivel de servicio con menor sobredimensionamiento frente a supuestos deterministas; muestra que la integración del biogás mitiga la incertidumbre en redes rurales y mejora la adecuación de potencia; concluye que la planificación basada en escenarios probabilísticos es más robusta para fijar tamaños de grupo electrógeno y reglas de operación en contextos rurales con biogás.

Ulukardesler (2023) evaluaron la co-digestión anaerobia de pasto + estiércol bovino (con lodo) y estimar cinética y reducción de GEI; enfoque experimental mesofílico ($\approx 35^\circ\text{C}$), diseño por lotes de 65 días con proporciones de pasto/estiércol del 5–25 % (base de VS); entre sus resultados: máximo rendimiento $331.75\text{ mL biogás gVS}^{-1}$ y $206.64\text{ mL CH}_4\text{ gVS}^{-1}$ en el 25 % de pasto; la co-digestión elevó sostenidamente el metano frente a mono-sustratos y permitió estimar reducciones de GEI respecto a disposición convencional; concluyendo que co-digester pasto con estiércol mejora la productividad de metano y ofrece beneficios ambientales cuantificables, útil para planificar balance energético en microunidades rurales

Velásquez (2020) realizaron una investigación que propone una solución para aprovechar energéticamente los residuos orgánicos generados por los cerdos en la granja El Recreo, ubicada en las cercanías de Guadalajara de Buga. La idea central es crear un proceso sinérgico que combine una gestión eficiente de los residuos, la generación de energía y la reducción de los costos operativos de la granja, a través de la implementación de un sistema económico para la producción de biogás y generación de energía. Para llevar a cabo este planteamiento, se realizó una visita a la granja para evaluar el terreno, conocer la cantidad de animales y su fase productiva. Con esta información, se calculó el potencial energético de los residuos orgánicos, se diseñaron los sistemas necesarios para purificar el biogás y se eligió el generador de energía y los componentes eléctricos adecuados. Se optó por utilizar tuberías y accesorios de PVC de 3/8" debido a su bajo costo y resistencia a la corrosión. El diseño de la

trampa de condensados, el filtro de H₂S y el sistema de absorción de CO₂ se realizó con el objetivo de minimizar la complejidad y los costos de instalación. La planta de generación de energía seleccionada, de la marca Puxin, tiene la capacidad de generar 1200 W de potencia de manera continua durante 4 horas, lo que representa un ahorro mensual de \$77.094 pesos para la granja. Para el sistema eléctrico, se diseñó un mecanismo de transferencia manual que permite seleccionar si el circuito eléctrico funciona con la red general o con la planta generadora de energía. Finalmente, se realizó un análisis económico para evaluar la viabilidad financiera del proyecto.

Albitres (2020) elaboraron un estudio cuyo objetivo fue proponer la creación de una planta generadora de electricidad utilizando el biogás producido de manera anaeróbica a partir del estiércol de ganado vacuno, con el fin de satisfacer la demanda energética del centro poblado Nuevo Perú. El estudio se lleva a cabo mediante la recopilación de datos de las familias residentes en la zona y la cantidad de estiércol generado por el ganado, que es la principal actividad económica de la región. Los resultados muestran que la cantidad de estiércol disponible es más que suficiente para generar el biogás necesario para cubrir la demanda energética del centro poblado. Sin embargo, los análisis económicos realizados al final del proyecto indican que, desde una perspectiva de inversión privada, el proyecto no resulta viable. Esto se debe a que los costos operativos son elevados, y se necesitaría una significativa reducción de estos gastos, así como el apoyo de una entidad externa para financiar prácticamente toda la inversión. Sin este respaldo, la viabilidad económica del proyecto se ve comprometida.

Barrios (2023) elaboró un estudio cuyo objetivo fue diseñar un sistema de biodigestión que aproveche el estiércol bovino para cubrir la demanda eléctrica de una comunidad rural en el sector Santa Julia – C. P. Salitral, Motupe, Lambayeque sin acceso al servicio público; de enfoque aplicado y diseño no experimental, trabajó con las 18 viviendas y 106 habitantes del caserío, utilizando observación, guías de análisis documental y fichas técnicas para cuantificar consumos eléctricos, disponibilidad de biomasa y requerimientos de generación; los resultados mostraron que cada vivienda consume en promedio 2614 Wh/día, lo que proyectado al conjunto poblacional implicó una demanda sectorial de 6,995 W diarios, y hacia un horizonte de 20 años un incremento a 8,907.5 W y 54,389.8 Wh/día; en cuanto al recurso, se identificaron 179 cabezas de ganado que producen 594.8 kg de estiércol/día, lo cual permitió dimensionar un biodigestor de geomembrana de PVC capaz de generar 5.4 m³ de biogás diarios, almacenados en un tanque cilíndrico de 10.8 m³ (dos días de producción), comprimido a 3.6 m³ operativos;

el sistema contempló trampas de H₂S, válvulas de seguridad y un grupo electrógeno de 9 kW; la evaluación económica confirmó la viabilidad: con una inversión inicial de S/ 15,328, el proyecto alcanzó un VAN de S/ 3,421.78, una TIR mensual del 3.3 % (muy superior a la tasa social del 1 %) indicadores que evidencian rentabilidad.

Castañeda y Herrera García (2019) desarrollaron un estudio cuyo objetivo fue diseñar un sistema que aproveche el estiércol vacuno como fuente energética renovable para cubrir la demanda eléctrica de la Hacienda El Potrero Bellavista – Jaén; de enfoque aplicado y diseño no experimental, empleó como población las 500 reses de la hacienda, de las cuales se tomó una muestra de 133 reses durante 15 días para caracterizar la producción de estiércol, obteniéndose un promedio de 10 kg/res/día; los cálculos indicaron que para el dimensionamiento del sistema se requerían 270 reses, con lo que se estimó una producción de 2,700 kg/día de estiércol, equivalente a 11.9 m³/día, que con la adición de agua en proporción 1:2 alcanzó una carga diaria de 17.3 m³. Con un tiempo de retención hidráulico de 20 días, el biodigestor diseñado tuvo un volumen líquido de 346 m³ y una fase gaseosa del 33 %, totalizando 460.18 m³; el biodigestor seleccionado fue de tipo tubular, con 4,58 m de diámetro y 27.93 m de longitud, fabricado en material plástico flexible, instalado en una zanja acondicionada; la producción de biogás se estimó en 123.52 m³/día, con un contenido de metano del 65 %, equivalente a 80.29 m³ CH₄/día o 3,35 m³ CH₄/hora, lo que permitió calcular una potencia eléctrica teórica de 21.44 kW; considerando las eficiencias del motor y del generador (50 % y 92.5 % respectivamente), la potencia real entregada fue de 9.91 kW, suficiente para cubrir la máxima demanda eléctrica de 8.966 kW de la hacienda; el sistema incluyó un filtro desulfurador marca Diybiogas, modelo ES-50L y un grupo electrógeno a biogás marca YDNPOWER, modelo YDNYD-10 de 10 kW, con consumo de 3.3 m³/h de gas; la inversión total del sistema ascendió a S/ 33,030, y la evaluación económica mostró un VAN positivo de S/ 4,344.23 y una TIR del 13 %, con un periodo estimado de recuperación de 6 años, confirmando la rentabilidad técnica y financiera del proyecto.

Guevara (2025) elaboró un estudio cuyo objetivo fue implementar un sistema de biodigestores que aproveche el estiércol como materia prima para generar biogás, mejorando la calidad de vida en comunidades rurales de Cutervo; la investigación tuvo un enfoque descriptivo, con diseño no experimental, y se sustentó en un muestreo no probabilístico basado en la población de ganado vacuno de la zona; se utilizó principalmente la revisión bibliográfica y documental como técnica de recolección, apoyada en matrices ambientales (Leopold, importancia y riesgo); los resultados evidenciaron que el proceso natural de defecación del

ganado tiene un impacto negativo severo en el ambiente, con riesgos de 77,33 % en el entorno humano, 78 % en el entorno ecológico y 78 % en el socioeconómico, siendo críticos los efectos sobre la calidad del aire, agua y suelo; con base en criterios de costo, operatividad, geometría, mantenimiento y seguridad, se evaluaron seis alternativas de biodigestores y se determinó que el más adecuado para las condiciones de Cutervo era el biodigestor anaeróbico vertical con cúpula semiesférica y fondo cónico, por su resistencia, seguridad y facilidad de operación; el análisis técnico mostró que los 9 animales estudiados producían en conjunto 194.93 kg de CH₄/día, equivalentes a 70,176 kg de metano al año, cifra que evidencia el alto potencial energético del sistema; en cuanto a la viabilidad económica, con una inversión de S/ 846,848 (300 mil de aporte propio y 546,848 financiados), el proyecto demostró un VAN positivo de S/ 2 055,501.12 y una TIR de 84 %, concluyendo que la propuesta no solo asegura una fuente de energía limpia y sostenible, sino que también reduce la dependencia de GLP, mitiga la contaminación ambiental y genera un biofertilizante útil para la agricultura local.

Valdez y Lozano (2023) realizaron la tesis “Producción de biogás mediante combinación de estiércol vacuno y de cuy en la región Moquegua”, con el objetivo de producir biogás a partir de la mezcla de ambos sustratos y evaluar la influencia del pH y la temperatura en su rendimiento; la investigación tuvo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada y nivel explicativo, desarrollada bajo un diseño experimental con tres repeticiones, mediante la construcción de tres biodigestores de 80 L de capacidad, cargados con 72 L de agua, 2.5 kg de estiércol vacuno y 2 kg de estiércol de cuy; la población estuvo conformada por los residuos de la granja “El Lavadero” en Moquegua y la muestra fue la mezcla preparada en cada biodigestor. Se emplearon técnicas experimentales y observación directa, utilizando termómetros digitales, pHmetros y el principio de Arquímedes para medir volumen de gas; los resultados mostraron que el pH promedio fue de 7.60 y la temperatura de 26.91 °C, condiciones óptimas para la metanogénesis; la producción de biogás comenzó alrededor del día 15, alcanzando su pico entre los días 35 y 50, con un rendimiento total acumulado de 42.75 L de biogás en el biodigestor 1, 42.12 L en el biodigestor 2 y 39.65 L en el biodigestor 3, logrando en promedio 41.5 L de biogás en 60 días; concluyendo que la combinación de estiércol vacuno y de cuy es técnicamente viable para generar biogás, siempre que se mantenga un pH cercano a la neutralidad y temperaturas mesofílicas alrededor de 26 °C, además de demostrar que los biodigestores a pequeña escala pueden replicarse en zonas rurales para mejorar el manejo de residuos y obtener energía renovable.

Gonzales y Lozano (2023) desarrollaron un estudio cuyo objetivo fue diseñar y evaluar un sistema que aproveche el estiércol porcino como fuente de biogás para abastecer la demanda energética de la granja Don Víctor, Jaén; la investigación tuvo un enfoque aplicado, cuantitativo, de tipo experimental y diseño descriptivo, trabajando con la población total de 100 cerdos; para caracterizar la disponibilidad de materia prima, se midió la producción de estiércol y orina (750.8 kg/día en promedio) y se calculó la generación de biogás según parámetros de la FAO; el sistema seleccionado utilizó un biodigestor tipo laguna cubierta, con un volumen de diseño de 234.39 m³ y un gasómetro de 117.19 m³ para almacenamiento; los resultados indicaron una producción de 31.53 m³/día de biogás, lo que permitió alimentar un generador de 3 kW de potencia, produciendo en promedio 37.64 kWh/día de electricidad, suficientes para cubrir la demanda energética de la granja; en la evaluación económica, la propuesta requirió una inversión inicial de S/ 35,790.11, arrojando un VAN de S/ 35,790.11 y un TIR del 36 %, confirmando su viabilidad financiera y sostenibilidad en el tiempo; concluyendo que el sistema no solo garantiza la autosuficiencia eléctrica de la granja, sino que también representa una alternativa ambientalmente responsable frente al manejo inadecuado de residuos porcinos, generando además biofertilizante como subproducto.

Delgado (2018) desarrolló un estudio cuyo objetivo fue diseñar un sistema que utilice biogás para alimentar ventiladores y mitigar el estrés calórico del ganado, mejorando la productividad lechera en la Asociación de Ganaderos de Lambayeque; de enfoque aplicado y diseño descriptivo-proyectivo, trabajó con la población de 340 cabezas de ganado (265 vacas lecheras) de la asociación, que producían en promedio 3 302 kg de estiércol/día; a partir de este residuo se estimó una producción de 21.4 m³ de biogás limpio diarios, suficientes para cubrir un requerimiento de 88.8 kW/día destinados a ventiladores industriales seleccionados tras una matriz de criterios técnicos y económicos; el sistema contempló un biodigestor tipo chino, un desulfurador, un tanque de homogenización y un grupo electrógeno Caterpillar modelo G3508 de 485 kW de potencia, adecuado para operar con biogás; la evaluación económica mostró un VAN de S/ 931,087.21, una TIR del 63.5 % y una relación beneficio/costo de 2.74, indicadores que evidenciaron una alta rentabilidad y rápida recuperación de la inversión; concluyendo que la implementación del biodigestor no solo resolvía la necesidad energética del sistema de ventilación, sino que además contribuía a mejorar la productividad lechera, reducía la contaminación ambiental y representaba un modelo replicable para asociaciones ganaderas en condiciones climáticas similares.

Vásquez (2020) elaboró un estudio cuyo objetivo fue diseñar un sistema autosuficiente que aproveche el estiércol bovino para generar electricidad y reducir la dependencia de combustibles fósiles y de la concesionaria eléctrica en el Fundo San José – Cajamarca; tuvo un enfoque aplicado, diseño no experimental y alcance descriptivo-proyectivo, considerando como población y muestra el fundo San José, con sus 19 reses y las cargas eléctricas de la unidad productiva; se emplearon fichas de observación, mediciones de consumo eléctrico y cálculos técnicos basados en literatura especializada; los resultados mostraron que la potencia instalada era de 3.52 kW, con una máxima demanda de 2.98 kW y un consumo energético de 9.294 kWh diarios; la producción de estiércol alcanzó en promedio 182.9 kg/día, equivalente a 9.625 kg/res/día, lo que permitió estimar una generación de 7.3 m³ de biogás diarios, suficiente para cubrir el requerimiento del sistema; el biodigestor diseñado fue de tipo tubular (biobolsa), con un volumen total de 10,91 m³ (8.19 m³ líquidos y 2,73 m³ gaseosos), cargado con estiércol y agua en proporción 1:2; el sistema incluyó un generador de 3 kW, con consumo de 2,1 m³/h de biogás, capaz de producir la energía necesaria para la operación del fundo; en la evaluación económica se estimó un costo de instalación de S/ 4,436.50 y un mantenimiento anual de S/ 825,00; los ahorros anuales alcanzaron S/ 2,091.33, resultando un VAN de S/ 128,33 y una TIR del 13 % a una tasa de descuento del 12 %, indicadores positivos a partir del quinto año del proyecto; concluyendo que la propuesta evidenció que el uso de biodigestores tubulares en pequeños fundos es técnica y financieramente viable, ya que no solo garantiza el abastecimiento eléctrico sino que también reduce emisiones contaminantes y genera biofertilizante como subproducto.

El objetivo general planteado es diseñar y evaluar un sistema integrado de biodigestión y generación eléctrica a biogás para el Fundo Nuevo Mundo, dimensionando el biodigestor y un generador, y verificando su desempeño con métricas técnico-económicas y ambientales: cobertura de la demanda (≥ 5.72 kWh/día y 2.26 kW de potencia pico), producción y eficiencia eléctrica (kWh/m³ de biogás y pureza de CH₄), y rentabilidad (VAN y TIR), así como la reducción de emisiones (tCO_{2e}/año) respecto de una alternativa diésel. Y como objetivos específicos: 1) Evaluar el requerimiento energético del Fundo Nuevo Mundo mediante inventario de cargas, estimando potencia instalada (kW), demanda máxima (kW), energía diaria (kWh/día) y perfil horario; 2) cuantificar el volumen de estiércol generado por el ganado vacuno del Fundo Nuevo Mundo mediante censo por categoría (toros y vacas) y aplicación del 6 % del peso vivo como tasa diaria de excreción, obteniendo la producción total (kg/día) y la fracción aprovechable según tiempo de permanencia en corral (25 %) y pérdidas de recolección (7.5 %);

3) diseñar el sistema integrado de biodigestión y generación eléctrica del Fundo Nuevo Mundo, seleccionando el biodigestor mediante matriz de criterios; definir los parámetros de proceso, estimar la producción de biogás, especificar el acondicionamiento del gas (trampa de condensados, deshumidificación y filtro de H₂S), dimensionar y documentar presiones de operación del digestor, y seleccionar el grupo electrógeno con sus especificaciones e integración eléctrica; y 4) evaluar la viabilidad económica de la generación eléctrica con biogás del sistema diseñado, construyendo el flujo de caja a 10 años a partir del CAPEX del sistema (presupuesto detallado), los ingresos por ahorro frente a la alternativa convencional y los OPEX anuales (operación y mantenimiento), y calculando los indicadores VAN y TIR.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Ubicación del área de estudio

2.1.1. Ubicación geográfica

El estudio se enmarca en el distrito de Imaza, provincia de Bagua, región Amazonas, a orillas del río Marañón; Imaza es un distrito amazónico cuya capital es Chiriaco; se asienta en selva baja a orillas del río Marañón y del río Chiriaco, con altitudes típicas cercanas a 300–350 m s. n. m. y clima cálido-húmedo (lluvias marcadas entre noviembre y abril); su población es mayoritariamente awajún (aguaruna), organizada en comunidades nativas y caseríos ribereños; la economía se basa en agricultura familiar (cacao, café, plátano, yuca, maíz), ganadería menor, pesca y comercio local; los servicios y la logística se concentran en Chiriaco, que articula salud, educación, combustibles y trámites.

Figura 1

Distrito de Imaza



Nota. Mapa referencial del distrito de Imaza (provincia de Bagua, región Amazonas), se muestran límites distritales, principales centros poblados y la red vial que sigue el valle del río Marañón (PE-5NC), con fines de ubicación del área de estudio.

2.2. Materiales

Materiales para la evaluación económica:

- Herramientas de software (Excel, herramientas de modelado económico): Para realizar cálculos de costos e ingresos, analizar la viabilidad económica y hacer proyecciones a largo plazo.
- Documentación de costos: Precios de materiales para biodigestores, generadores, y otros componentes involucrados, así como tarifas energéticas locales y costos de operación de equipos.

Materiales y herramientas para encuestas y análisis sociales:

- Dispositivos de registro de datos (tabletas, laptops o grabadoras de voz)

Equipo de protección personal (EPP):

- Guantes, mascarillas, y gafas de seguridad

2.3. Población, muestra y muestreo

2.3.1. Población

Está conformada por todas las unidades que se observan directamente en el Fundo Nuevo Mundo para cumplir los objetivos: a) equipos eléctricos inventariados para el cálculo del requerimiento energético (luminarias, electrodomésticos y cargas varias) y b) cabezas de ganado vacuno (toros y vacas) consideradas para la estimación de producción diaria de estiércol; para el marco poblacional se utilizó el inventario de cargas (equipos y potencias) y el censo ganadero levantados en campo y sistematizados en el estudio (64 reses: 4 toros y 60 vacas).

2.3.2. Muestra

Dado que el tamaño es acotado y accesible, se aplicó muestreo por censo (conteo exhaustivo); por tanto, la muestra coincide con la población: todos los equipos inventariados y todas las cabezas de ganado registradas.

2.4. Método

Tipo de investigación

Esta investigación será de tipo aplicada que tiene como objetivo desarrollar una propuesta para la creación de un sistema de generación de electricidad mediante el uso de biogás, con el fin de abastecer de energía eléctrica al Fundo Nuevo Mundo, ubicado en Imaza, región de Amazonas; el proyecto busca aprovechar los recursos orgánicos disponibles en la zona para generar energía sostenible, contribuyendo tanto al desarrollo de la comunidad local como a la promoción de fuentes de energía renovables (Bernal, 2021).

Asimismo, se considera de enfoque cuantitativo porque se basa en la recolección y análisis de datos numéricos y medibles; el estudio calculó y cuantificó aspectos específicos como el requerimiento energético del fundo, el volumen de estiércol producido por el ganado y la cantidad de biogás que se puede generar; asimismo, se realizó un análisis económico y viabilidad financiera; en este tipo de investigación, los datos obtenidos se analizan estadísticamente para establecer relaciones y obtener conclusiones objetivas, lo que permite medir la efectividad y viabilidad del sistema propuesto de manera concreta y precisa (Escobar et al., 2018).

Esta investigación es descriptiva porque su propósito principal es detallar y analizar la situación actual del Fundo Nuevo Mundo en relación con sus necesidades energéticas y los recursos disponibles, sin intervenir ni manipular las variables de estudio; se centra en recoger información sobre aspectos como la cantidad de estiércol generado por el ganado, el consumo energético del fundo, para luego describir cómo pueden ser aprovechados para la generación de biogás; en lugar de experimentar con nuevas condiciones o realizar pruebas, la investigación se limita a observar, documentar y presentar los datos que permiten entender las características del contexto y la viabilidad de la propuesta (Niño, 2019).

2.4.1. Diseño

Esta investigación se clasifica como de diseño no experimental porque no se llevó a cabo un proceso de manipulación o control directo de las variables involucradas; en lugar de realizar experimentos, se enfoca en la propuesta y el diseño de un sistema de generación eléctrica utilizando biogás para abastecer al Fundo Nuevo Mundo en Imaza, Amazonas; el

estudio buscó analizar, planificar y proponer una solución técnica viable basándose en datos existentes, sin intervenir directamente en los procesos o modificar las condiciones actuales del entorno (Ñaupas et al., 2018).

Asimismo, es de corte transversal porque se enfoca en el análisis de variables en un solo momento o en un período específico de tiempo, sin intervenir o manipular las condiciones de manera experimental; el estudio no sigue un proceso a largo plazo ni involucra un seguimiento continuo de los cambios a lo largo del tiempo, sino que recopila y analiza datos sobre la situación actual del fundo, como el requerimiento energético y la cantidad de estiércol generado; el diseño transversal permite obtener una visión puntual de la realidad del Fundo Nuevo Mundo en el presente, con el objetivo de proponer una solución viable para el suministro eléctrico mediante biogás en ese contexto específico (Palomino et al., 2019).

Esta investigación es propositiva porque su principal objetivo fue plantear una solución práctica y viable a un problema específico: el suministro de energía eléctrica para el Fundo Nuevo Mundo; esta investigación se enfoca en proponer un sistema de generación eléctrica utilizando biogás, con el fin de satisfacer las necesidades energéticas del fundo de manera sostenible; así, el enfoque propositivo busca aportar una solución concreta, basada en el aprovechamiento de recursos locales (como el estiércol del ganado) para generar energía renovable, promoviendo un desarrollo más autónomo y sostenible (Ramírez y Calles, 2021).

2.4.2. Alcance de la investigación

Alcance temporal

El presente estudio se desarrolló únicamente durante el año 2025, periodo en el cual se ejecutaron todas las etapas metodológicas previstas, la delimitación temporal de un año se considera pertinente, ya que ofrece un marco realista para llevar a cabo el diagnóstico energético del Fundo Nuevo Mundo, el diseño del sistema de generación a partir de biogás, el análisis de viabilidad económica y la sistematización de resultados; la elección de este horizonte responde tanto a criterios de factibilidad académica como a la necesidad de obtener información actualizada y contextualizada a las condiciones específicas del año de la investigación.

Definir un alcance temporal concreto en una investigación aplicada es esencial, puesto que permite organizar las actividades de manera secuencial, establecer cronogramas factibles y garantizar la coherencia entre los objetivos planteados y los resultados esperados (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018); asimismo, delimitar la investigación a un año calendario fortalece la rigurosidad metodológica, evitando desviaciones y asegurando que los hallazgos respondan a las realidades contemporáneas del contexto analizado (Creswell y Creswell, 2018); en este sentido, circunscribir el estudio al año 2025 no solo aporta claridad en la planificación y ejecución, sino que también asegura que los resultados obtenidos reflejen fielmente las condiciones técnicas, económicas y sociales propias del periodo en el que se desarrolla la investigación.

Alcance espacial

La presente investigación se circunscribe al Fundo Nuevo Mundo, ubicado en el distrito de Imaza, provincia de Bagua, en la región Amazonas, Perú; este espacio ha sido delimitado como ámbito exclusivo de estudio debido a que concentra las condiciones necesarias para el desarrollo del proyecto: presencia de una actividad pecuaria significativa, generación de estiércol vacuno en volúmenes constantes y una demanda energética que actualmente enfrenta limitaciones en términos de cobertura y estabilidad del suministro; el análisis se enfoca únicamente en este fundo como unidad productiva, lo que permite establecer un contexto claramente definido para la aplicación de la propuesta de generación eléctrica a partir de biogás; esta delimitación espacial garantiza que la investigación mantenga coherencia metodológica, pues se centra en un entorno real y concreto donde los resultados pueden ser observados y evaluados en función de sus impactos técnicos, ambientales y económicos.

Delimitar de manera precisa el espacio de estudio es una práctica indispensable en investigaciones de carácter aplicado, ya que favorece la validez de los hallazgos y facilita su replicabilidad en escenarios con características similares (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018); además, situar el proyecto en un territorio específico como Imaza – Amazonas permite considerar factores contextuales como la disponibilidad de recursos locales, las condiciones geográficas y las necesidades energéticas propias de la zona, aspectos clave para la pertinencia y viabilidad de la propuesta (Creswell & Creswell, 2018).

Alcance normativo

La presente investigación se encuentra enmarcada en el conjunto de normas, reglamentos y políticas vigentes en el Perú relacionadas con la energía, el medio ambiente y la gestión de residuos sólidos y orgánicos; en primer lugar, se toma en consideración la Ley N° 27345 – Ley de Promoción del Uso Eficiente de la Energía, que establece lineamientos para impulsar alternativas energéticas sostenibles y racionalizar el consumo (Congreso de la República del Perú, 2000); asimismo, el estudio se enmarca en la Ley General del Ambiente (Ley N° 28611), la cual promueve el aprovechamiento responsable de los recursos naturales y fomenta tecnologías limpias que reduzcan el impacto al medio ambiente (Congreso de la República del Perú, 2005).

En el ámbito energético específico, el proyecto se alinea con la Ley N° 28832 – Ley para Asegurar el Desarrollo Eficiente de la Generación Eléctrica, que busca diversificar las fuentes de energía y garantizar la seguridad del suministro eléctrico en zonas rurales (Congreso de la República del Perú, 2006); de igual forma, se consideran las disposiciones técnicas y regulatorias establecidas por el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN) y el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), entidades encargadas de regular y supervisar proyectos vinculados a la generación eléctrica y al uso de energías renovables no convencionales; adicionalmente, la investigación se sustenta en lineamientos internacionales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, particularmente el ODS 7: Energía asequible y no contaminante y el ODS 13: Acción por el clima, que promueven la transición hacia sistemas energéticos sostenibles y resilientes (ONU, 2015).

El alcance normativo delimita la investigación a un cumplimiento estricto de las leyes internacionales y nacionales vigentes, garantizando que la propuesta de generación de electricidad a partir de biogás no solo sea técnicamente viable y económicamente rentable, sino también jurídicamente sostenible y ambientalmente responsable.

El diseño y la operación propuesta se enmarcan en la legislación peruana vigente sobre energía, ambiente, residuos y seguridad industrial, así como en buenas prácticas internacionales para sistemas de biogás y generación distribuida; a efectos de trazabilidad, se presenta un checklist de verificación de cumplimiento por eje temático (energía, ambiente, seguridad del gas, instalaciones eléctricas y gestión de residuos).

Tabla 1*Check list normativo del sistema propuesto*

Eje	Norma / referencia	Requisito clave	Cómo se cumple en la propuesta
Energía	Ley 27345 – Uso Eficiente de la Energía	Medidas de eficiencia y gestión de la demanda	Operación del GE a 60–80% de carga; curva %carga–m ³ /h y horarios
Energía	Ley 28832 – Desarrollo eficiente de la generación	Diversificación con fuentes renovables locales	Sustitución de diésel por biogás del propio fundo
Ambiente	Ley 28611 – Ley General del Ambiente	Prevención de impactos y valorización	Digestión anaerobia + uso de biofertilizante; reducción de CH ₄ fugitivo
Residuos	Gestión de residuos orgánicos (criterios MINAM/FAO)	Aprovechamiento y control sanitario	Protocolo de carga 1:2 y TRH=20 d
Seguridad del gas	Buenas prácticas (válvula antirretorno, trampa de condensados, filtro H ₂ S)	Control de H ₂ S y condensados; evitar retrocesos de llama	Filtro H ₂ S, trampa de condensados y válvula antirretorno incluidos
Eléctrico	Código Nacional de Electricidad – Utilización	Protección, puesta a tierra y transferencia segura	Tablero con seccionamiento, térmicos, etc.
Seguridad ocupacional	D.S. 005-2012-TR (SST)	Procedimientos, EPP y señalización	Procedimientos de arranque/paro, EPP y check list pre-arranque

Nota. Elaboración basada en normativa peruana aplicable a la propuesta elaborada

La propuesta contribuye directamente a los ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y 13 (acción por el clima), y de manera complementaria al ODS 12 (producción y consumo responsables) al valorizar residuos orgánicos. Se definen indicadores con línea base y metas operativas, alineados a las metas 7.1, 7.2, 7.3, 12.5 y

13.2; las fórmulas usan datos del propio diseño (demanda 5.72 kWh/d; producción 16.9 m³/d; rendimiento 1.64 kWh·m⁻³; GE 3 kW, operación 60–80% de carga).

Tabla 2

Indicadores vinculados a ODS (fórmulas, línea base y meta)

ODS (meta)	Indicador	Fórmula	Línea base	Meta del proyecto
7.1 Acceso	Cobertura de demanda diaria (%)	$(\text{Energía GE} / 5.72) \times 100$	0%	$\geq 100\%$ continuo
7.2 Renovables	Fracción renovable del suministro (%)	$(\text{kWh biogás} / \text{kWh totales}) \times 100$	0%	$\geq 95\%$
7.3 Eficiencia	Eficiencia eléctrica del biogás (kWh·m ³)	$\text{kWh entregados} / \text{m}^3 \text{ consumidos}$	—	≥ 1.60 kWh·m ⁻³
12.5 Residuos	Aprovechamiento de estiércol (%)	$(\text{kg/d aprovechados} / 2340) \times 100$	0%	$\geq 17.5\%$ (409.5 kg·d)
13.2 Clima	Reducción de CO ₂ e (t·año)	$\text{kWh desplazados} \times (\text{kgCO}_2/\text{kWh diésel}) / 1000$	—	$\geq 1.7\text{--}2.3 \text{ t}\cdot\text{a}$

Nota. Auditar mensualmente kWh entregados, m³ consumidos, horas de operación y el factor de emisión adoptado.

Alcance técnico

El alcance técnico de la presente investigación comprende el conjunto de actividades, procedimientos e instrumentos empleados para diseñar y evaluar la propuesta de un sistema de generación eléctrica a partir de biogás en el Fundo Nuevo Mundo, distrito de Imaza, provincia de Bagua, región Amazonas; desde esta perspectiva, el estudio no se limita únicamente a un análisis teórico, sino que abarca el levantamiento de información primaria y secundaria, el procesamiento de datos energéticos y productivos, así como la elaboración de un diseño tecnológico adaptado a las condiciones locales; en primer lugar, se contempló la evaluación de la demanda energética actual del fundo, mediante la recopilación de datos sobre consumos eléctricos, lo cual permitió

dimensionar la capacidad requerida del sistema; en segundo lugar, se procedió a la cuantificación de la biomasa disponible (estiércol bovino), aplicando factores de conversión establecidos en estudios técnicos y normativos para estimar el volumen de biogás susceptible de ser generado.

Luego, el alcance técnico abarcó el diseño preliminar de un biodigestor, considerando parámetros de eficiencia, seguridad y sostenibilidad; este diseño integró tanto los componentes estructurales (biodigestor, tuberías, almacenamiento) como los eléctricos (motor-generador, reguladores, conexiones), asegurando su operatividad bajo las condiciones climáticas y productivas de la región; finalmente, se realizó un análisis económico y de viabilidad técnica, proyectando costos de inversión, operación y mantenimiento, así como beneficios esperados y aprovechamiento de recursos renovables.

Este tipo de alcance se justifica porque permite garantizar que la propuesta no quede en el plano conceptual, sino que avance hacia una alternativa viable y factible de implementación, como señalan Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), el alcance técnico en proyectos de investigación aplicada define los límites de acción y el nivel de profundidad con el cual se abordará el problema, asegurando rigurosidad en los resultados, asimismo, Creswell y Creswell (2018) sostienen que la delimitación técnica es clave para articular la metodología con los objetivos del estudio, dado que proporciona la estructura necesaria para alcanzar hallazgos pertinentes y aplicables.

Alcance metodológico

El alcance metodológico de la presente investigación se orientó hacia un enfoque cuantitativo, de carácter aplicado y descriptivo, cuyo propósito es generar una propuesta tecnológica concreta que responda a la necesidad de mejorar el suministro eléctrico en el Fundo Nuevo Mundo, Imaza – Amazonas, a través de una propuesta de un sistema de generación basado en biogás; este diseño metodológico permitió no solo describir la situación actual en cuanto a consumo energético y disponibilidad de biomasa, sino también plantear soluciones viables sustentadas en datos económicos y técnicos.

En primer lugar, se recurrió a la recolección de información primaria y secundaria, la información primaria se obtuvo mediante observación directa y registros de campo sobre la cantidad de estiércol bovino, así como el inventario de equipos y actividades que demandan electricidad en el fundo; la información secundaria se recopiló a partir de

fuentes bibliográficas, normativas técnicas, artículos científicos y manuales de diseño de biodigestores, lo cual permitió contrastar los datos locales con experiencias previas y parámetros estandarizados; la investigación también contempló el uso de técnicas de análisis cuantitativo para dimensionar el sistema, entre estas se incluyen fórmulas de conversión de biomasa en volumen de biogás, estimaciones de poder calorífico y cálculos de eficiencia de generación eléctrica; asimismo, se aplicaron herramientas de evaluación económica, con el fin de determinar la viabilidad de la propuesta.

Metodológicamente, la investigación se ubicó en un nivel descriptivo-propositivo: descriptivo porque analizó y caracterizó la situación actual de consumo y disponibilidad de recursos energéticos; y propositivo porque plantea un diseño técnico-económico que responde a la problemática detectada; como señalan Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), este tipo de alcance es pertinente en investigaciones aplicadas, dado que busca no solo comprender una realidad, sino también ofrecer alternativas de solución; en la misma línea, Creswell y Creswell (2018) destacan que la coherencia metodológica entre los objetivos y el diseño de investigación asegura que los resultados obtenidos sean pertinentes, válidos y útiles para la toma de decisiones..

2.4.3. Técnicas

La metodología de la presente investigación se sustentó en la aplicación de dos técnicas fundamentales que permitieron garantizar la validez y la pertinencia de los resultados obtenidos: la observación directa y el análisis documental, ambas han sido seleccionadas de acuerdo con la naturaleza del estudio, dado que permiten abordar de manera integral tanto el contexto real del Fundo Nuevo Mundo como el marco teórico, normativo y técnico que respalda la propuesta de generación eléctrica a partir de biogás:

Observación directa

La observación directa se empleó como técnica central para recoger información empírica en el escenario de estudio, sin mediaciones ni interpretaciones de terceros, esta técnica permitió identificar, describir y registrar aspectos esenciales de la realidad investigada, como la cantidad de ganado vacuno existente en el fundo y los patrones de consumo eléctrico; el uso de esta técnica se justifica porque brinda datos objetivos, inmediatos y contextualizados, lo cual es indispensable para dimensionar el potencial de producción de biogás, además, posibilita el seguimiento de los procesos naturales y

productivos tal como ocurren en su contexto, reduciendo sesgos y fortaleciendo la confiabilidad de la información obtenida; según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), la observación directa es esencial en investigaciones aplicadas que buscan describir fenómenos en su entorno real, pues ofrece evidencia empírica sobre la cual sustentar decisiones metodológicas y técnicas.

Análisis documental

El análisis documental constituye la segunda técnica fundamental del estudio, orientada a la revisión, selección y sistematización de información secundaria relevante para la investigación, esta técnica permitió examinar de manera crítica artículos científicos indexados, tesis relacionadas, manuales técnicos de biodigestores, estadísticas oficiales del sector agropecuario y energético, así como la normativa nacional e internacional vinculada al uso de energías renovables y la gestión ambiental.

El empleo de esta técnica resultó necesario porque asegura la construcción de una base teórica y normativa sólida, que servirá como sustento conceptual del diseño del sistema de generación eléctrica propuesto; a través del análisis documental, se podrán identificar parámetros técnicos estandarizados para la conversión de estiércol en biogás, así como experiencias exitosas de proyectos similares implementados en otros contextos; como afirman Creswell y Creswell (2018), la revisión documental en investigaciones aplicadas permite fortalecer la validez del diseño metodológico y garantizar que las propuestas estén fundamentadas en evidencia científica y marcos regulatorios vigentes.

Dado que el Fundo Nuevo Mundo carece de suministro eléctrico continuo, no fue posible instalar data-loggers de energía en línea; para caracterizar el consumo, se aplicó un protocolo de estimación por inventario de cargas: potencia nominal de placa, horas de uso reportadas por los usuarios y verificación visual de hábitos; este enfoque es consistente con estudios en contextos rurales sin red y garantiza trazabilidad y reproducibilidad del cálculo. Para temperatura de diseño del biodigestor se usaron registros climáticos locales (rango térmico típico en Imaza) y criterios de literatura para definir TRH=20 días, parámetro ya reflejado en el dimensionamiento del sistema; en anexos se incorporan fichas técnicas de los equipos propuestos para la fase de implementación, a emplearse cuando el sistema entre en operación.

2.4.4. Procedimiento

A continuación, se detalla el procedimiento a seguir para alcanzar cada uno de los objetivos de esta investigación:

1. Evaluar el requerimiento energético del Fundo Nuevo Mundo

- Levantar información de los equipos eléctricos presentes en la unidad productiva.
- Registrar la potencia nominal y el tiempo promedio de uso de cada equipo.
- Sistematizar los datos en tablas para calcular la potencia instalada y el consumo diario de energía.
- Determinar la demanda eléctrica base que debe cubrir el sistema de generación a biogás.

2. Cuantificar el volumen de estiércol generado por el ganado vacuno presente

- Realizar un censo del ganado clasificado por categoría (toros, vacas, etc.).
- Aplicar el criterio técnico de excreción diaria (5–6 % del peso vivo).
- Multiplicar el peso promedio de cada categoría por el factor de excreción y el número de animales.
- Estimar el volumen total de estiércol disponible como materia prima para la biodigestión.

3. Elaborar el diseño del sistema integrado de biodigestor y generador eléctrico

- Seleccionar el tipo de biodigestor más adecuado mediante matriz de criterios técnicos.
- Definir parámetros de diseño: tiempo de retención hidráulico, volumen de carga diaria y relación estiércol–agua.
- Dimensionar la capacidad del biodigestor en función de la biomasa disponible.
- Seleccionar el generador eléctrico en función de la potencia que puede suministrar el biogás.
- Integrar el sistema con la infraestructura existente en el fundo, asegurando operatividad y sostenibilidad.

4. Realizar un análisis económico sobre la viabilidad de la producción de electricidad mediante biogás

- Elaborar un presupuesto detallado que incluya equipos, obras civiles, sistema eléctrico y montaje.
- Establecer los costos de operación, mantenimiento y reposición de componentes críticos.
- Estimar los ingresos derivados del ahorro en electricidad y de los créditos de carbono.
- Construir un flujo de caja proyectado a 10 años.
- Calcular los indicadores financieros (VAN y TIR) para determinar la rentabilidad del sistema.

III. RESULTADOS

3.1. Evaluar el requerimiento energético del Fundo Nuevo Mundo mediante inventario de cargas, estimando potencia instalada (kW), demanda máxima (kW), energía diaria (kWh/día) y perfil horario

Con el propósito de cumplir con el objetivo de evaluar el requerimiento energético del Fundo Nuevo Mundo, se realizó un levantamiento de información sobre los equipos eléctricos disponibles; este procedimiento permitió identificar la cantidad de artefactos, su potencia nominal, las horas promedio de uso diario y, en consecuencia, estimar tanto la potencia instalada total como el consumo energético diario. El análisis de estos parámetros constituye una etapa esencial para determinar la demanda máxima de energía y para dimensionar el sistema de generación eléctrica a partir de biogás y su infraestructura asociada (biodigestor, generador, etc.) para el suministro del Fundo Nuevo Mundo, Imaza–Amazonas.

Tabla 3

Potencia instalada y consumo energético diario de equipos eléctricos en el Fundo Nuevo Mundo

Equipo	Cantidad	Potencia (W)	Uso (h/día)	Potencia Instalada (W)	Energía (kWh/día)
Foco LED	8	10	4	80	0.32
Televisor 32"	1	100	4	100	0.40
Radio	1	30	2	30	0.06
PC + Monitor	1	200	4	200	0.80
Refrigeradora	1	300	9	300	2.70
Licuada	1	400	0.1	400	0.04
Plancha	1	1,000	0.5	1,000	0.50
Ventilador	2	75	6	150	0.90
Totales				2,260	5.72

Nota. La potencia instalada corresponde a la suma de las potencias nominales de cada equipo, mientras que la energía diaria se calculó en función del tiempo promedio de uso (h/día).

La Tabla 3 presentada constituye la base para evaluar el requerimiento energético del Fundo Nuevo Mundo, paso fundamental en el diseño de la propuesta de un sistema de generación eléctrica a partir de biogás; se observa que la potencia instalada total es de 2,260 W (2.26 kW), distribuida entre cargas de iluminación, equipos de entretenimiento, informática y electrodomésticos de uso doméstico; destacan equipos de mayor demanda puntual, como la plancha (1,000 W) y la refrigeradora (300 W), que si bien no operan de manera continua, inciden de forma significativa en el dimensionamiento del sistema; el consumo energético diario estimado asciende a 5.72 kWh/día, este valor resulta crítico, ya que define el balance energético necesario para dimensionar la producción de biogás, la capacidad del biodigestor, el rendimiento del moto generador, etc.; en este contexto, el análisis energético realizado constituye el punto de partida técnico para la propuesta de un sistema de generación eléctrica a partir de biogás, ya que asegura que la infraestructura propuesta pueda cubrir las necesidades energéticas del Fundo Nuevo Mundo de manera eficiente, sostenible y conforme a la normativa peruana vigente.

3.2. Cuantificar el volumen de estiércol generado por el ganado vacuno del Fundo Nuevo Mundo mediante censo por categoría (toros y vacas) y aplicación del 6 % del peso vivo como tasa diaria de excreción, obteniendo la producción total (kg/día) y la fracción aprovechable según tiempo de permanencia en corral (25 %) y pérdidas de recolección (7.5 %).

Para estimar la cantidad de estiércol generado por el ganado vacuno, se consideró en primer lugar el número total de animales registrados en el Fundo Nuevo Mundo, dato que fue obtenido a través de la visita de campo realizada por los investigadores (ver Anexo 1); este registro constituye la base empírica necesaria para proyectar la disponibilidad de biomasa aprovechable como materia prima en la producción de biogás; de manera complementaria, se tomó en cuenta el criterio técnico señalado por especialistas en producción pecuaria, quienes establecen que el ganado vacuno excreta diariamente alrededor del 6% de su peso vivo en estiércol y orina, lo que permite calcular de manera aproximada el volumen de residuos orgánicos generados por animal, dicho valor de referencia es consistente con lo reportado en la literatura científica, donde se indica que la producción diaria de estiércol bovino oscila entre el 5% y el 6% del peso vivo, dependiendo de factores como la alimentación, la edad y el sistema de crianza (Font-Palma, 2019); este procedimiento metodológico permite no solo cuantificar el volumen de biomasa disponible, sino también fundamentar la capacidad potencial de

generación de biogás del sistema propuesto, garantizando un dimensionamiento acorde a la realidad productiva del Fundo Nuevo Mundo.

Tabla 4

Producción diaria de estiércol de ganado vacuno según categoría

Tipos de ganado vacuno	Cantidad de ganado vacuno	Peso (Kg)	% Peso	G_e : Generación diaria de estiércol (Kg/día)
Toro	4	750	6%	180
Vaca	60	600	6%	2,160
Total	64			2,340

Nota. Los valores se estimaron considerando un 6% del peso vivo de cada animal, con base en los datos del Fundo Nuevo Mundo, para dimensionar la biomasa disponible en la generación de biogás.

Los resultados de la Tabla 4 evidencian que la producción diaria total de estiércol bovino en el Fundo Nuevo Mundo alcanza los 2,340 kg/día, de los cuales la mayor proporción corresponde a las vacas debido a su predominio numérico frente a los toros; esta magnitud de biomasa disponible constituye un insumo significativo para la generación de biogás, asegurando un suministro constante de materia prima y respaldando la viabilidad técnica del sistema propuesto.

3.3. Diseñar el sistema integrado de biodigestión y generación eléctrica del Fundo Nuevo Mundo, seleccionando el biodigestor mediante matriz de criterios; definir los parámetros de proceso, estimar la producción de biogás, especificar el acondicionamiento del gas, dimensionar presiones de operación del digestor, y seleccionar el grupo electrógeno con sus especificaciones e integración eléctrica.

3.3.1. Cálculo de la producción de biogás a partir de estiércol bovino

3.3.1.1. Tiempo de retención hidráulico (TRH)

La estimación del volumen de biogás a producir a partir del estiércol bovino se determina considerando uno de los parámetros operativos más relevantes del proceso de digestión anaerobia: el tiempo de retención hidráulico (TRH), este parámetro se define como el periodo, expresado en días, durante el cual la materia orgánica permanece dentro del biodigestor, lo que asegura una adecuada degradación de los sustratos y, en consecuencia, una producción eficiente de biogás; diversos autores coinciden en que el tiempo de retención puede variar entre 10 y 30 días, dependiendo de factores como la temperatura de operación, el tipo de sustrato y las condiciones del sistema; en general, se observa que a mayor temperatura de operación, el tiempo de retención requerido es menor, dado que la actividad metabólica de los microorganismos metanogénicos se acelera en ambientes más cálidos (Weiland, 2010; Pérez, 2010).

Tabla 5

Relación entre temperatura de funcionamiento y TRH recomendado en digestión anaerobia

Temperatura de funcionamiento (°C)	TRH (días)
18	28
24	20
30	14
35	10
40	10

Nota. Los valores corresponden a rangos experimentales reportados en la literatura especializada sobre biodigestión anaerobia, donde se evidencia que el TRH disminuye a medida que aumenta la temperatura de operación (Weiland, 2010; Pérez, 2010).

En el caso específico de la zona donde se desarrolla esta investigación, caracterizada por un clima templado–cálido propio de Imaza (Amazonas), se ha considerado pertinente establecer un tiempo de retención de referencia de 20 días (Tabla 5), este valor equilibra la eficiencia del proceso de digestión anaerobia con las condiciones ambientales locales, asegurando así un cálculo más realista del potencial de producción de biogás en el Fundo Nuevo Mundo; a fin de sustentar la elección, se realizó un análisis de sensibilidad térmica: ante descensos estacionales hacia 18 °C, el TRH recomendado se eleva a 28 días; en condiciones más cálidas (30 °C), el TRH puede reducirse a 14 días. Bajo estos escenarios, el TRH de 20 días garantiza estabilidad del proceso, y las variaciones estacionales pueden gestionarse mediante ajustes en el régimen de carga (dilución/frecuencia) sin requerir cambios tecnológicos; de este modo, el diseño queda explícitamente vinculado al régimen térmico local y muestra robustez frente a fluctuaciones razonables de temperatura.

TRH = tiempo de retención hidráulico

$$TRH = 20 \text{ días}$$

Se adopta TRH = 20 días para el dimensionamiento del biodigestor, este valor se aplica con $Q = 1,219 \text{ m}^3/\text{d}$ en el cálculo de V_{bio} (subsección 3.3.1.10), obteniéndose $V_{\text{útil}} = 24.38 \text{ m}^3$, con lo cual se garantiza la coherencia TRH–V–Q manteniendo la dilución 1:2.

3.3.1.2. Tasa promedio diaria de producción de estiércol por unidad de ganado vacuno (E_d)

De acuerdo con la literatura especializada, la producción diaria promedio de estiércol bovino puede variar en un rango aproximado de 10 a 40 kilogramos por animal, dependiendo de factores como la edad, el peso vivo, la dieta y el sistema de manejo productivo; estos valores de referencia han sido ampliamente documentados en investigaciones sobre digestión anaerobia y aprovechamiento energético de residuos pecuarios (Møller et al., 2004; Weiland, 2010).

$$E_d = \frac{Ge}{\text{Cantidad de ganado vacuno}}$$

$$E_d = \frac{2,340 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{64}$$

$$E_d = 36.56 \frac{kg}{día}$$

En el marco del presente estudio, y considerando la necesidad de realizar una estimación conservadora y realista, se ha decidido trabajar con un 25% del total de estiércol producido por el ganado vacuno del Fundo Nuevo Mundo, este porcentaje se justifica en función de que no toda la biomasa generada puede ser recolectada de manera efectiva para el biodigestor, ya que parte de ella se pierde en el campo o se destina a otros usos agrícolas tradicionales, como el abonamiento directo de suelos; de este modo, la cuantificación considera únicamente la fracción utilizable, lo que otorga mayor precisión al cálculo del potencial de producción de biogás.

En la zona de estudio, la crianza del ganado vacuno se desarrolla mayoritariamente bajo un sistema extensivo, lo cual implica que los animales pastan en campo abierto la mayor parte del día; en consecuencia, no es posible recolectar la totalidad del estiércol producido, debido a que este queda disperso en el terreno; a partir de la visita realizada al Fundo Nuevo Mundo, se determinó que el ganado permanece en los corrales en promedio seis horas al día, mientras que el resto del tiempo se encuentra en pastoreo libre; para estimar el porcentaje de estiércol aprovechable en el biodigestor, se estableció una proporción de aprovechamiento en función del tiempo de permanencia en el corral, así, considerando que un día tiene 24 horas, se plantea que el 100% del estiércol corresponde al total de la producción diaria, y que las seis horas de encierro equivalen a una fracción de esta producción; mediante una simple regla de tres se obtuvo lo siguiente:

$$P_a = \frac{6h \times 100\%}{24h}$$

$$P_a = 25\%$$

3.3.1.3. Cantidad diaria de estiércol disponible para aprovechamiento (E_{da})

De esta manera, únicamente el 25% del estiércol producido diariamente puede ser recolectado de manera efectiva (P_a), sin embargo, debe tenerse en cuenta que durante el proceso de recolección se producen pérdidas inevitables, estimadas en un 7.5% (P_p) de total generado, en consecuencia, el porcentaje real de estiércol disponible para biodigestión y producción de biogás se reduce al 17.5% del total generado diariamente; esta aproximación metodológica resulta coherente con estudios previos sobre el manejo de estiércol en sistemas de producción

extensiva, los cuales señalan que la fracción utilizable de la biomasa depende directamente del tiempo de confinamiento de los animales y de las pérdidas asociadas a la recolección y manejo de residuos pecuarios (Møller et al., 2004; Triolo et al., 2011).

$$E_{da} = (P_a - P_p) * G_e$$

Donde:

E_{da} : Cantidad diaria de estiércol disponible para aprovechamiento

P_a : Porcentaje de estiércol aprovechable

P_p : Porcentaje de pérdidas en la recolección del estiércol

G_e : Generación diaria de estiércol (Kg/día)

$$E_{da} = (25\% - 7.5\%) * 2340 \frac{kg}{día}$$

$$E_{da} = (17.5\%) * 2340 \frac{kg}{día}$$

$$E_{da} = 409.50 \frac{kg}{día}$$

El cálculo realizado evidencia que, aunque la generación total de estiércol bovino en el Fundo Nuevo Mundo es de 2,340 kg/día, únicamente una fracción puede ser efectivamente recolectada y utilizada para la producción de biogás; en primer lugar, debido a que el sistema de crianza es extensivo, solo se logra aprovechar el 25% del estiércol correspondiente al tiempo en que los animales permanecen en corrales; posteriormente, al descontar las pérdidas inevitables de recolección estimadas en un 7,5%, el valor final se reduce a un 17,5% del total generado, lo que equivale a 409,5 kg/día de estiércol efectivamente disponible para el biodigestor.

Este resultado es coherente con la literatura, ya que diversos estudios sobre sistemas ganaderos extensivos sostienen que la disponibilidad real de biomasa pecuaria se ve condicionada por la dispersión del estiércol en pastoreo y por las limitaciones operativas en su recolección (Møller et al., 2004; Triolo et al., 2011); en consecuencia, el valor de 409.5 kg/día constituye la base realista de insumo sobre la cual debe dimensionarse el sistema de

biodigestión anaerobia, asegurando que las proyecciones de producción de biogás respondan a las condiciones concretas del fundo y no a una disponibilidad teórica idealizada.

3.3.1.4. Cantidad de agua destinada a la dilución del estiércol (A_d)

La cantidad de agua destinada a la dilución del estiércol (A_d) constituye un parámetro fundamental en el diseño y operación de biodigestores, ya que permite regular la concentración de sólidos totales y favorecer las condiciones óptimas del proceso anaerobio; este volumen se determina en función de la cantidad de estiércol efectivamente utilizable (E_{da}) y de la proporción de agua (R_a) requerida para alcanzar una mezcla adecuada; matemáticamente, se expresa de la siguiente manera:

$$A_d = E_{da} * R_a$$

Donde:

A_d : Agua para la dilución del estiércol

E_{da} : Estiércol disponible aprovechable (Kg/día)

R_a : Relación agua – estiércoles (en este caso 1:2)

De acuerdo con la literatura especializada, el estiércol bovino presenta un contenido de materia seca entre el 15 % y el 20 %, lo que implica que una parte corresponde a sólidos y el resto a líquidos; para el correcto funcionamiento del biodigestor, es necesario ajustar esta concentración mediante dilución, con el objetivo de mantener una mezcla cercana al 8–10 % de sólidos totales, considerada óptima para la digestión anaerobia (Møller et al., 2004; Yadvika et al., 2004).

Diversos estudios sobre biodigestión señalan que la proporción entre biomasa y agua es un parámetro fundamental para garantizar el adecuado funcionamiento del digestor; en términos generales, cuando la carga alimenticia se compone principalmente de estiércol fresco, la dilución recomendada oscila entre 1:1 y 1:2 (un kilogramo de estiércol por uno o dos kilogramos de agua); esta proporción favorece una mezcla con la viscosidad adecuada y una concentración de sólidos que permite la actividad óptima de los microorganismos metanogénicos; en contraste, cuando el sustrato proviene mayoritariamente de residuos vegetales, que suelen presentar un mayor contenido de fibra y menor humedad, es necesario incrementar la adición de agua para lograr una consistencia manejable, utilizándose una relación cercana a 1:3 (FAO, 2008).

La literatura técnica respalda esta práctica; Khanal (2011) enfatiza que el equilibrio hídrico en la biomasa es esencial para evitar la inhibición del proceso anaerobio, recomendando mantener sólidos totales entre 8 % y 12 % en digestores de tipo húmedo; de forma similar, Weiland (2010) advierte que una excesiva concentración de sólidos puede generar obstrucciones e ineficiencia en la digestión, mientras que un exceso de agua diluye la carga orgánica y reduce la producción de metano por unidad de volumen; en ese sentido, establecer relaciones de 1:1 a 1:2 para estiércol no es arbitrario, sino que responde a criterios técnicos que buscan mantener un balance entre la fluidez del sustrato, la carga orgánica y la eficiencia energética del biodigestor.

En el caso del presente estudio, tomando una proporción de dilución de 1:2 (dos partes de agua por cada parte de estiércol), se obtiene:

$$A_d = 409.50 * 2$$

$$A_d = 819 \text{ litros de } \frac{\text{agua}}{\text{día}}$$

3.3.1.5. Mezcla diaria de alimentación del biodigestor (agua + estiércol) (M_{ab})

La carga de entrada al biodigestor (M_{ab}) corresponde al total de la mezcla de agua de dilución (A_d) y estiércol disponible aprovechable (E_{da}) que ingresa diariamente al sistema; este parámetro es fundamental, ya que determina el volumen de alimentación del biodigestor y, por ende, condiciona tanto el tiempo de retención hidráulico como la estabilidad del proceso anaerobio; su cálculo se establece a través de la siguiente expresión:

$$M_{ab} = A_d + E_{da}$$

Donde:

M_{ab} : Mezcla diaria de alimentación del biodigestor (kg o L/día)

A_d : Agua de dilución (kg o L/día)

E_{da} : Estiércol disponible aprovechable (kg/día)

$$M_{ab} = 819 \text{ litros de } \frac{\text{agua}}{\text{día}} + 409.50 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$M_{ab} = 1,228.50 \frac{\text{kg entrada}}{\text{día}}$$

El cálculo realizado indica que la mezcla diaria de alimentación del biodigestor (M_{ab}) asciende a 1,228.50 kg/día, considerando un volumen de 819 litros de agua de dilución y 409,5 kg de estiércol bovino efectivamente disponible; este valor representa la carga total que ingresa al biodigestor cada día, la cual debe mantenerse constante para garantizar condiciones estables de operación; desde un punto de vista técnico, esta cantidad de sustrato es fundamental para determinar el tiempo de retención hidráulico (TRH), pues a mayor volumen de carga, mayor será el tamaño requerido del biodigestor para asegurar una permanencia adecuada del material y una degradación completa de la materia orgánica; asimismo, la proporción calculada entre agua y estiércol (2:1) asegura que la mezcla mantenga una concentración de sólidos compatible con los parámetros óptimos de digestión anaerobia, estimados entre 5% y 10% de sólidos totales para sistemas de biogás de tipo rural (Mata-Alvarez et al., 2011); en consecuencia, este resultado no solo constituye un dato cuantitativo, sino que define la base de diseño del reactor anaerobio, impactando directamente en su volumen útil, la eficiencia en la producción de biogás y la estabilidad general del proceso.

Con la dilución 1:2 (agua:estiércol) y el estiércol disponible $E_{da} = 409.5 \text{ kg/d}$, se obtiene la mezcla diaria $M_{ab} = E_{da} + A_d = 1,219 \text{ kg/d} \approx 1,219 \text{ m}^3/\text{d}$, valor que se adopta como Q para el dimensionamiento de volumen (véase 3.3.1.10), este caudal se utiliza explícitamente en la relación $TRH = V/Q$.

3.3.1.6. Contenido de materia seca en el estiércol (C_{ms})

La materia seca en el estiércol corresponde a la fracción sólida del estiércol bovino recolectado diariamente, es decir, aquella parte libre de humedad que constituye el sustrato real susceptible de degradación en el proceso de digestión anaerobia; este parámetro es esencial, ya que permite dimensionar la carga orgánica que ingresa al biodigestor y, en consecuencia, estimar el potencial de producción de biogás; su cálculo se establece mediante la siguiente relación:

$$C_{ms} = E_{da} \times P_{st}$$

Donde:

C_{ms} : Contenido de materia seca en el estiércol (kg/día)

E_{da} : Estiércol disponible aprovechable (kg/día)

P_{st} : Porcentaje de sólidos totales en el estiércol (%)

La literatura especializada señala que el estiércol bovino presenta en promedio entre un 15 % y 20 % de sólidos totales, dependiendo del sistema de crianza y del régimen alimenticio del ganado (Holm-Nielsen et al., 2009); según esto el cálculo quedaría de la siguiente manera:

$$C_{ms} = 409.50 \frac{kg}{día} \times 0.20$$

$$C_{ms} = 81.90 \frac{kg \text{ de sólidos}}{día}$$

Este resultado significa que, de los 409.50 kg diarios de estiércol utilizable, únicamente 81.90 kg corresponden a materia seca, los cuales representan la fracción efectiva que puede transformarse en metano dentro del biodigestor.

3.3.1.7. Carga diaria de sólidos volátiles (L_{sv})

La carga diaria de sólidos volátiles, corresponde a la cantidad de materia orgánica susceptible de degradación biológica que ingresa al sistema por unidad de tiempo; este parámetro resulta fundamental para dimensionar y evaluar el rendimiento de procesos de tratamiento como la digestión anaerobia, ya que indica la fracción real de sólidos orgánicos presentes en los residuos; diversos estudios técnicos han señalado que los lodos generados en procesos de tratamiento biológico contienen un alto porcentaje de materia orgánica, que suele oscilar entre el 60 % y el 80 % de los sólidos totales, siendo el 75 % una cifra de referencia ampliamente utilizada para cálculos de diseño y operación (Wisconsin Department of Natural Resources, 2016).

Este valor es relevante porque los sólidos volátiles representan la fracción biodegradable, es decir, aquella que los microorganismos transforman durante la digestión anaerobia; un mayor contenido de sólidos volátiles implica mayor disponibilidad de sustrato orgánico y, en consecuencia, mayor potencial de producción de biogás y metano, lo que se traduce en beneficios energéticos y económicos para la planta de tratamiento; por ello,

considerar un 75 % de sólidos volátiles permite no solo dimensionar de forma más precisa la carga orgánica diaria, sino también anticipar la eficiencia del proceso de estabilización y el rendimiento energético del sistema. (Wisconsin Department of Natural Resources, 2016).

La carga diaria de sólidos volátiles (L_{SV}) se determina multiplicando la masa diaria de sólidos secos presentes en el efluente (C_{ms}) por el porcentaje de sólidos volátiles (P_{SV}), en términos prácticos, la fórmula es:

$$L_{SV} = C_{ms} * P_{SV}$$

Donde:

L_{SV} : Carga diaria de sólidos volátiles (kg/día)

C_{ms} : Contenido de materia seca en el estiércol (kg/día)

P_{SV} : Porcentaje de sólidos volátiles (%)

$$L_{SV} = 81.90 * 75\%$$

$$L_{SV} = 61.43 \frac{\text{kg de sólidos volátiles}}{\text{día}}$$

3.3.1.8. Porcentaje de sólidos volátiles en la corriente de entrada al biodigestor ($P_{SV.in}$)

El porcentaje de sólidos volátiles en la entrada al biodigestor, hace referencia al porcentaje de sólidos totales que corresponde a fracción orgánica y biodegradable en la corriente de alimentación diaria; este parámetro resulta esencial para estimar la carga orgánica efectiva disponible para el proceso de digestión anaerobia y, consecuentemente, para proyectar el potencial de generación de biogás; este parámetro se obtiene a partir de la relación entre la carga diaria de sólidos volátiles (L_{SV}) y la carga de entrada al biodigestor (M_{ab}), lo cual se expresa en la siguiente formula:

$$P_{SV.in} = \frac{L_{SV}}{M_{ab}} \times 100$$

Donde:

$P_{SV.in}$: Porcentaje de sólidos volátiles en la entrada (%)

L_{SV} : Carga diaria de sólidos volátiles (kg/día)

M_{ab} : Mezcla diaria de alimentación del biodigestor (kg o L/día)

$$P_{SV.in} = \frac{61.43}{1,228.50} \times 100$$

$$P_{SV.in} = 5\%$$

Este resultado es especialmente relevante porque la eficiencia de un digestor depende en gran medida de la proporción de sólidos volátiles presentes en el afluente, un porcentaje bajo, como en este caso (5 %), puede implicar que la mezcla de entrada tiene un alto contenido de fracción inorgánica o humedad, reduciendo la disponibilidad de sustrato orgánico para la generación de biogás; por el contrario, valores más altos de $P_{SV.in}$ se asocian con mayor potencial de producción energética y mejor desempeño del sistema.

La literatura técnica señala que, para lograr una operación estable en digestores anaerobios, los contenidos de sólidos volátiles deben representar entre el 2 % y el 10 % de la mezcla de entrada, dependiendo del tipo de sustrato y de la configuración del digestor (Appels et al., 2011; Mata-Alvarez et al., 2014). En este sentido, un $P_{SV.in}$ del 5 % se encuentra dentro de un rango técnicamente aceptable, aunque con un potencial de producción moderado.

3.3.1.9. Volumen diario del afluente (mezcla líquida y sólida) al biodigestor (V_{in})

El volumen diario del afluente al biodigestor, corresponde a la cantidad total de mezcla líquida y sólida que se introduce al reactor en un período de 24 horas; este parámetro es fundamental en el diseño hidráulico del sistema, ya que influye directamente en el tiempo de retención hidráulica (TRH) (relación entre el volumen del reactor y el caudal de alimentación) y, por ende, determina el tamaño necesario del digestor para garantizar una digestión eficiente y una adecuada producción de biogás; en sistemas de carga continua o semicontinua, calcular correctamente el V_{in} es imprescindible para garantizar la estabilidad operativa y optimizar tanto la biodegradación como el uso del espacio disponible (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2011). El volumen diario del afluente debe calcularse como la suma de los volúmenes parciales de estiércol y agua, obtenidos a partir de sus masas respectivas y densidades, lo cual se expresa en la siguiente fórmula, donde el primer término representa el volumen de estiércol y el segundo el volumen de agua:

$$V_{in} = V_{estiercol} + V_{agua}$$

$$V_{in} = \frac{E_{da}}{\delta_e} + \frac{A_d}{\delta_{H2O}}$$

Donde:

V_{in} : Volumen diario del afluente (mezcla líquida y sólida) al biodigestor

$V_{estiercol}$: Volumen diario de estiércol

V_{agua} : Volumen diario de agua

E_{da} : Cantidad diaria de estiércol disponible para aprovechamiento

δ_e : Densidad del estiércol húmedo (1,016 kg/m³)

A_d : Agua para la dilución del estiércol

δ_{H2O} : Densidad del agua (1,000 kg/m³)

En la literatura técnica, la densidad del estiércol de vaca sin digestión oscila entre 990 y 1,065 kg/m³, según un estudio sobre estiércol lácteo con sólidos totales entre el 1,5 % y el 13 % (Wang et al., 2019); en este estudio, el valor de 1,016 kg/m³ se adopta como densidad representativa estándar del estiércol húmedo, ya que se encuentra dentro del rango documentado (Kiely y Veza, 1999); por lo que el cálculo sería de la siguiente manera:

$$V_{in} = \frac{409.50}{1,016} + \frac{819}{1,000}$$

$$V_{in} = 0.40 \text{ m}^3 + 0.819 \text{ m}^3$$

$$V_{in} = 1.219 \text{ m}^3/\text{día}$$

Considerando una producción diaria utilizable de estiércol de 409.50 kg/día y aplicando una dilución de 1:2 (estiércol:agua), se requiere 819 kg de agua diarios, equivalentes a 0.819 m³/día; por su parte, el estiércol húmedo, con una densidad de 1,016 kg/m³, corresponde a un volumen de 0.40 m³/día; de esta manera, el volumen total del afluente que ingresa al biodigestor

es de aproximadamente 1.219 m³/día, valor que resulta fundamental para el cálculo del tiempo de retención hidráulico y el dimensionamiento del reactor.

3.3.1.10. Volumen requerido por el biodigestor (V_{bio})

En sistemas de digestión anaerobia, el volumen del biodigestor es el espacio físico necesario para retener el sustrato diario durante un tiempo de retención (TRH) adecuado, de modo que las bacterias anaerobias realicen la degradación orgánica eficientemente; matemáticamente, esto se expresa como:

$$V_{bio} = V_{in} \times TRH$$

Donde:

V_{bio} : Volumen requerido por el biodigestor

V_{in} : Volumen diario del afluente (mezcla líquida y sólida) al biodigestor (en m³/día)

TRH : Tiempo de retención hidráulica (en días), definido como el período promedio que el material permanece dentro del digestor antes de ser evacuado.

Este método es ampliamente utilizado en dimensionamiento técnico de biodigestores tanto en plantas continuas como por lotes, ya que permite asegurar una degradación adecuada y una producción de biogás eficiente (Obileke et al., 2022); por lo que el cálculo sería de la siguiente manera:

$$V_{bio} = V_{in} \times TRH$$

$$V_{bio} = 1.219 \frac{m^3}{día} \times 20 \text{ días}$$

$$V_{bio} = 24.38 \text{ m}^3$$

Con un aporte de sustrato de 1.219 m³/día y un tiempo de retención de 20 días, se determinó un volumen mínimo de 24.38 m³; este cálculo asegura que el material orgánico permanezca el tiempo suficiente en el interior del sistema para permitir una digestión anaerobia eficiente y garantizar una adecuada producción de biogás.

Ajuste de volumen útil (TRH-V-Q): considerando la dilución 1:2 (agua:estiércol) y el caudal diario de mezcla $Q = 1.219 \text{ m}^3/\text{d}$ (ver subsección del caudal), el volumen requerido para

un TRH de diseño de 20 días se determina por la relación $TRH = V/Q$; en consecuencia, el volumen hidráulico útil es $V_{\text{útil}} = 1.219 \text{ m}^3/\text{d} \times 20 \text{ d} = 24,38 \text{ m}^3$; se mantiene la dilución 1:2 y el TRH = 20 días operando el equipo BB30 (30 m³ nominal) con $V_{\text{útil}} = 24.38 \text{ m}^3$ (81,3 % del volumen nominal), la diferencia (5.62 m³) se reserva como holgura operativa para variaciones de caudal, sedimentación de sólidos y amortiguamiento de gas, preservando la estabilidad del proceso.

3.3.1.11. Relación de carga de sólidos volátiles por día y volumen del biodigestor (L_{svd})

Este parámetro representa la cantidad de sólidos volátiles aportados diariamente por cada metro cúbico de biodigestor, se calcula con la fórmula:

$$L_{svd} = \frac{L_{sv}}{V_{bio}}$$

Donde:

L_{svd} : Relación de carga de sólidos volátiles por día y volumen del biodigestor

L_{sv} : Carga diaria de sólidos volátiles (kg de sólidos volátiles/día)

V_{bio} : Volumen requerido por el biodigestor (m³)

$$L_{svd} = \frac{61.43 \frac{\text{kg de sólidos volátiles}}{\text{día}}}{24.38 \text{ m}^3}$$

$$L_{svd} = 2.52 \text{ Kg de sólidos volátiles}/(\text{m}^3 \cdot \text{día})$$

Este indicador también es conocido como la tasa de carga orgánica y se emplea ampliamente para garantizar una alimentación adecuada del sistema, evitando sobrecarga que genere acumulación de ácidos o inhibición bacteriana; en el presente caso, con una carga de 61.43 Kg de sólidos volátiles/día y un volumen de 24.38 m³, el L_{svd} calculado es aproximadamente 2.52 Kg de sólidos volátiles/(m³·día); este resultado se encuentra dentro del rango recomendado para estiércol vacuno en digestión mesofílica, el cual se sitúa entre 2 y 3 Kg de sólidos volátiles/m³·día (Mao et al., 2015); esto garantiza que el diseño propuesto opere en condiciones estables y con un equilibrio adecuado entre la carga orgánica y la capacidad microbiológica del sistema.

3.3.1.12. Producción volumétrica de biogás en el biodigestor (P_{bg})

En términos operativos, la producción de biogás se estima como el caudal diario generado a partir de la fracción de sólidos volátiles que realmente se biodegrada en el reactor; para estiércol bovino bajo digestión mesofílica, la literatura reporta rendimientos y conversiones compatibles con $Y_{bg} \approx 0.4\text{--}0.6 \text{ m}^3/\text{Kg}$ sólido volátil destruido y $\eta_{SV} \approx 0.45\text{--}0.65$ (Varol y Uğurlu, 2017) y se modela mediante la siguiente expresión:

$$P_{bg} = L_{SV} * Y_{bg} * \eta_{SV}$$

Donde:

P_{bg} : Producción volumétrica de biogás en el biodigestor (m^3)

L_{SV} : Carga diaria de sólidos volátiles (kg de sólidos volátiles/día)

Y_{bg} : Rendimiento específico de biogás (m^3/Kg sólido volátil destruido) $\approx 0.4\text{--}0.6 \text{ m}^3/\text{Kg}$ sólido volátil destruido

η_{SV} : Fracción de sólido volátil efectivamente destruida $\approx 0.45\text{--}0.65$

$$P_{bg} = 61.43 * 0.5 * 0.55$$

$$P_{bg} = 16.90 \frac{\text{m}^3 \text{ biogas}}{\text{día}}$$

El biodigestor produciría $\approx 16.9 \text{ m}^3$ de biogás por día, y considerando un contenido de metano de 50–60 %, el metano diario esperado sería 8,5–10,1 $\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{d}$; esto es coherente con los rangos de metano por kg sólidos volátiles añadido observados en estudios con estiércol bovino, una vez que se incorpora una destrucción de sólidos volátiles entre 50–60 % (Varol y Uğurlu, 2017).

En biodigestión mesofílica de estiércol bovino, la literatura reporta que los digestores logran conversiones de sólidos volátiles en el orden de 50–60 % y biogases con 50–60 % de metano; además, los rendimientos de metano observados para estiércol lechero suelen ubicarse entre 0.10 y 0.37 $\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg}$ sólidos volátiles añadido, valores que encajan con suelos de diseño donde se asume Y_{bg} de 0.4–0.6 m^3 de biogás/kg sólidos volátiles destruido (al considerar el CH_4

% del biogás y la fracción de sólidos volátiles removida); estos rangos están documentados en estudios mesofílicos con estiércol bovino, que también reportan conversiones de sólidos volátiles típicas cercanas al 50–60 % (Varol y Uğurlu, 2017).

Supuestos explícitos para el cálculo de rendimiento de biogás y su conversión a electricidad: la fracción sólida del estiércol se fijó con sólidos totales (ST)=15–20 % del estiércol fresco y sólidos volátiles (SV)=75 % de los ST; con 409,5 kg/d de estiércol utilizable esto da 81,9 kg/d de materia seca y 61,4 kg SV/d de carga orgánica (bases de cálculo en 3.3.1.6–3.3.1.7).; sobre esa base, el rendimiento específico de biogás adoptado fue 0.4–0.6 m³/kg SV destruido, con remoción de SV del 45–65 % en régimen mesofílico; ello conduce a una producción estimada de 16.9 m³ biogás/d (3.3.1.12); para la calidad del gas se asumió 50–60 % v/v de CH₄, y para la conversión a electricidad se consideró un contenido energético útil promedio de 1.64 kWh por m³ de biogás, valor que integra el poder calorífico del gas a 50–60 % CH₄ y la eficiencia eléctrica del motogenerador seleccionado; con ello, los 5.72 kWh/d de demanda se cubren con 3,5 m³/d de biogás y queda un margen operativo, en consistencia con la sección 3.3.4.10.

3.3.1.13. Conversión del biogás a energía eléctrica útil

El potencial energético del biogás no se limita a su volumen generado, sino a la cantidad de energía aprovechable en forma de electricidad; para este cálculo se toma como referencia el contenido de metano (CH₄) en el biogás, dado que este componente es el responsable del poder calorífico del combustible; de acuerdo con lo estimado, la producción diaria de metano oscila entre 8,45 m³ y 10,14 m³ CH₄/día, considerando un 50–60 % de CH₄ en el biogás total de 16,9 m³/día; el poder calorífico inferior (PCI) del metano se encuentra en aproximadamente 9,94 kWh/m³ CH₄ (equivalente a 35,8 MJ/m³), al multiplicar este valor por el volumen diario de metano disponible, se obtiene la energía química potencial del combustible:

$$E_{química} = V_{CH_4} * PCI_{CH_4}$$

Donde:

$E_{química}$: Energía química potencial del combustible

V_{CH_4} : Volumen diario de metano disponible

PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior del metano

$$E_{química} = (8.45 - 10.14)m^3CH_4/día * 9.94 kWh /m^3CH_4$$

$$E_{química} = 84 - 100.8 kWh /día$$

Este valor representa la energía térmica contenida en el metano producido diariamente, sin embargo, en el proceso de conversión a electricidad mediante un moto-generador a biogás, no toda esta energía se transforma en energía eléctrica, debido a las pérdidas inherentes al sistema (fricción, calor, gases de escape, etc.); los equipos de pequeña escala suelen presentar eficiencias de conversión entre 25 % y 35 %, dependiendo de la tecnología empleada, siendo razonable adoptar una eficiencia media del 30 %; la energía eléctrica útil se calcula entonces como:

$$E_{eléctrica} = E_{química} * \eta_{gen}$$

Donde:

$E_{eléctrica}$: Energía eléctrica útil

$E_{química}$: Energía química potencial del combustible

η_{gen} : Eficiencia del generador

$$E_{eléctrica} = (84 - 100.8 kWh /día) * 0.30$$

$$E_{eléctrica} = 25.2 - 30.2 kWh /día$$

Este resultado evidencia que el sistema propuesto podría generar entre 25 y 30 kWh diarios de electricidad neta, lo cual es 4 a 5 veces superior a la demanda energética diaria del Fundo Nuevo Mundo, previamente estimada en 5.72 kWh/día; en esta conversión se aplica 1.64 kWh/m³ biogás (gas a 50–60 % CH₄ + eficiencia eléctrica del motogenerador), consistente con el equipo especificado en 3.3.4.10.

Implicancias técnicas

- Excedente energético: El sistema no solo cubriría la demanda eléctrica doméstica y productiva del fundo, sino que generaría un margen suficiente para futuras ampliaciones o la incorporación de nuevos equipos eléctricos.
- Resiliencia operativa: El excedente de energía permitiría compensar eventuales disminuciones de producción de biogás (por variaciones en la disponibilidad de estiércol, temperatura o eficiencia del digestor).
- Aprovechamiento integral: El biogás podría destinarse no únicamente a la generación de electricidad, sino también a usos térmicos directos (cocción o calentamiento de agua), optimizando aún más el rendimiento global del sistema.

3.3.1.14. Análisis de sensibilidad

En el Fundo Nuevo Mundo la crianza es extensiva y el hato permanece en corrales 6 h/día, verificado en la visita y registros de campo; por ello, el estiércol potencialmente recolectable se aproxima a la fracción de encierro: $6/24 = 25\%$; adicionalmente, se consideraron pérdidas operativas por dispersión/adherencia y manejo de 7.5 %, valor conservador observado en la rutina de recolección; en consecuencia, la fracción efectiva usada en el dimensionamiento es $25\% - 7.5\% = 17.5\%$, que aplicada a la generación total (2,340 kg/d) arroja $E_{da} = 409,5$ kg/d de estiércol realmente disponible para biodigestión; para robustecer el supuesto, se realizó un análisis de sensibilidad: si el encierro varía entre 4–8 h/día (16.7–33.3 %) y las pérdidas entre 5–10 %, la captura efectiva oscila entre 11.7 % y 23.3 % del total, equivalente a 274–544 kg/d; aun en el escenario inferior, el sistema diseñado mantiene margen operativo gracias al volumen del BB30 y al TRH = 20 días, mientras que en el superior se dispone de mayor holgura para picos de demanda.

3.3.2. Biodigestor

Un biodigestor (también conocido como digestor anaeróbico o reactor biológico) es un sistema cerrado que descompone la materia orgánica mediante un proceso de digestión anaeróbica, es decir, en ausencia de oxígeno. Durante esta biotransformación, los microorganismos degradan residuos orgánicos generando principalmente biogás (una mezcla rica en metano y dióxido de carbono) y un subproducto denominado digestato, que puede dividirse en biol (fracción líquida) y bioabono (fracción sólida), ambos útiles como fertilizantes

debido a sus nutrientes retenidos (Meegoda et al., 2025); además de la producción energética y fertilizante, los biodigestores ofrecen varias ventajas clave:

- Reducción de patógenos y olores: La digestión anaeróbica estabiliza los residuos y disminuye la presencia de patógenos y olores, lo que minimiza los problemas sanitarios y redundante en un ambiente más saludable (Rocamora et al., 2020).
- Conservación de nutrientes: Nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio no se destruyen, sino que se transforman o quedan presentes en el digestato, lo que convierte a estos subproductos en fertilizantes valiosos que sustituyen al uso de abonos químicos (Hayyat et al., 2024).
- Producción de energía renovable: El biogás generado es una fuente energética limpia que puede emplearse para cocinar, generar electricidad o calefacción, reduciendo así la dependencia de combustibles fósiles y contribuyendo a la mitigación del cambio climático (Meegoda et al., 2025).

Características del biodigestor

Para garantizar su eficiencia y seguridad operativa, un biodigestor debe reunir una serie de características técnicas fundamentales que aseguren la estabilidad del proceso de digestión anaeróbica y la calidad del biogás producido:

1. Hermeticidad absoluta: El sistema debe ser completamente cerrado para impedir la entrada de aire, ya que la presencia de oxígeno interrumpe la actividad de los microorganismos metanogénicos y puede generar fallas en la producción de biogás (Schnürer y Jarvis, 2017).
2. Aislamiento térmico: La temperatura interna debe mantenerse estable, dado que las bacterias metanogénicas son sensibles a cambios bruscos; un buen aislamiento permite conservar la digestión en condiciones mesofílicas (30–40 °C) o termofílicas (50–55 °C), evitando pérdidas de rendimiento (Appels et al., 2011).
3. Válvula de seguridad para el gas: El biodigestor debe disponer de un sistema de regulación de presión (válvula de alivio), lo cual previene riesgos de explosión o daños estructurales ocasionados por sobrepresiones en la cúpula de biogás (Cucina et al., 2021).
4. Entradas y salidas diferenciadas: Es imprescindible contar con un punto de ingreso de la biomasa y otro de salida para el digestato, permitiendo una carga y descarga eficiente y continua sin afectar la digestión en curso (Garfi et al., 2016).

5. Facilidad de mantenimiento: El diseño debe contemplar accesos para inspección y limpieza periódica, ya que la acumulación de sólidos no degradados reduce el volumen útil y compromete la eficiencia (Ferrer et al., 2009).
6. Mecanismo de agitación o rompe-natas: Durante la digestión pueden formarse costras o natas en la superficie, que impiden la liberación del gas; por ello, se recomienda incluir un sistema mecánico o hidráulico que mantenga la homogeneidad del sustrato y evite la estratificación (Angelidaki et al., 2018).

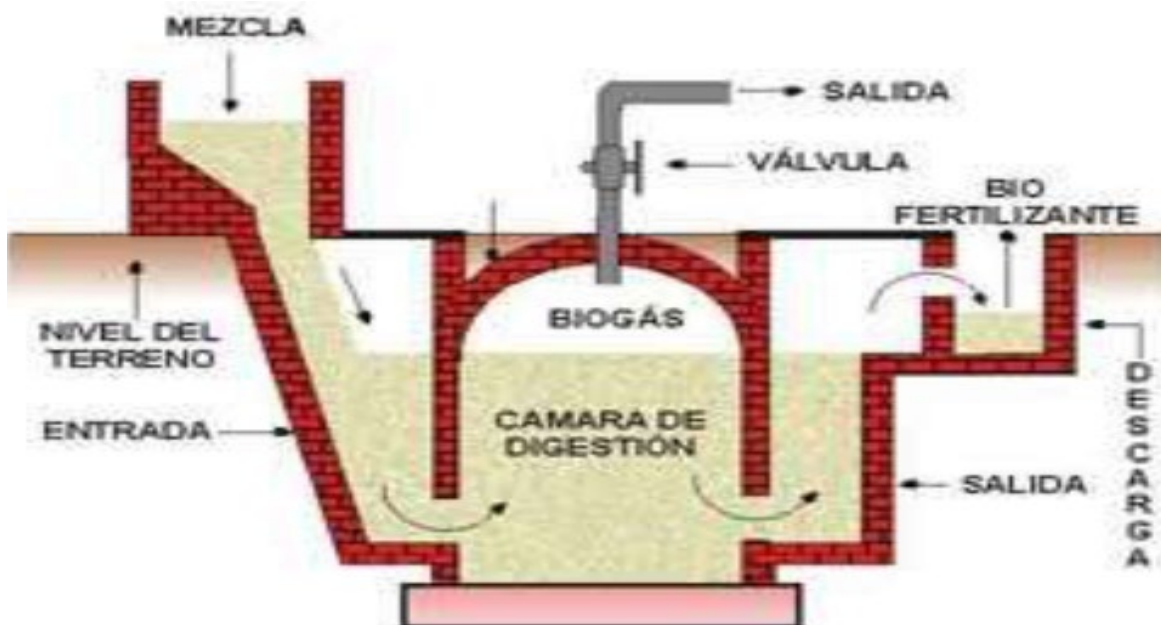
En conjunto, estas características permiten que el biodigestor opere de forma segura, continua y con una producción estable de biogás y subproductos fertilizantes.

3.3.2.1. Biodigestores continuos

Los biodigestores continuos son sistemas de digestión anaeróbica diseñados para operar de manera constante, en los cuales la carga de materia orgánica y la extracción del digestato se realizan de forma diaria o periódica; este tipo de biodigestor es muy común en ámbitos domésticos y rurales, debido a que su operación es sencilla, requiere un nivel básico de supervisión y no demanda conocimientos técnicos especializados (Garfí et al., 2016).

Figura 2

Esquema de un biodigestor continuo para la producción de biogás



Nota. La figura ilustra el funcionamiento de un biodigestor continuo, donde el sustrato se introduce de manera diaria y el biogás se genera de forma constante en la cámara de digestión (Barrera-Cardoso et al., 2020).

Estos digestores cuentan con al menos tres orificios principales: uno destinado al ingreso de la biomasa fresca (estiércol, residuos vegetales, aguas residuales domésticas), otro para la salida del digestato líquido (biol) y un tercero para la salida de los sólidos estabilizados (bioabono); gracias a este diseño, el sistema mantiene un flujo estable de materia y permite un equilibrio en la producción de biogás (Koch et al., 2016).

Ventajas

- Simplicidad de operación: el control del proceso se realiza regulando únicamente la cantidad de sustrato introducido diariamente, lo que facilita su manejo en zonas rurales.
- Disponibilidad de biogás constante: al operar en régimen continuo, el biodigestor asegura una producción relativamente estable de energía, siempre que se mantenga el balance de carga (Angelidaki et al., 2018).
- Aprovechamiento comunitario y doméstico: su bajo costo de instalación y mantenimiento lo hace ideal para viviendas, granjas familiares y comunidades rurales con recursos limitados (Ferrer et al., 2009).

Desventajas

- Alto consumo de agua: para mantener la dilución adecuada del sustrato, estos sistemas requieren un volumen significativo de agua, lo cual puede ser una limitación en zonas áridas (Garfi et al., 2011).
- Ausencia de agitación mecánica: la falta de un mezclador interno genera dificultades al procesar materiales densos o más pesados que el agua, como ciertos residuos agrícolas lignocelulósicos; esto puede ocasionar sedimentación y reducción de la capacidad efectiva del digestor (Appels et al., 2011).

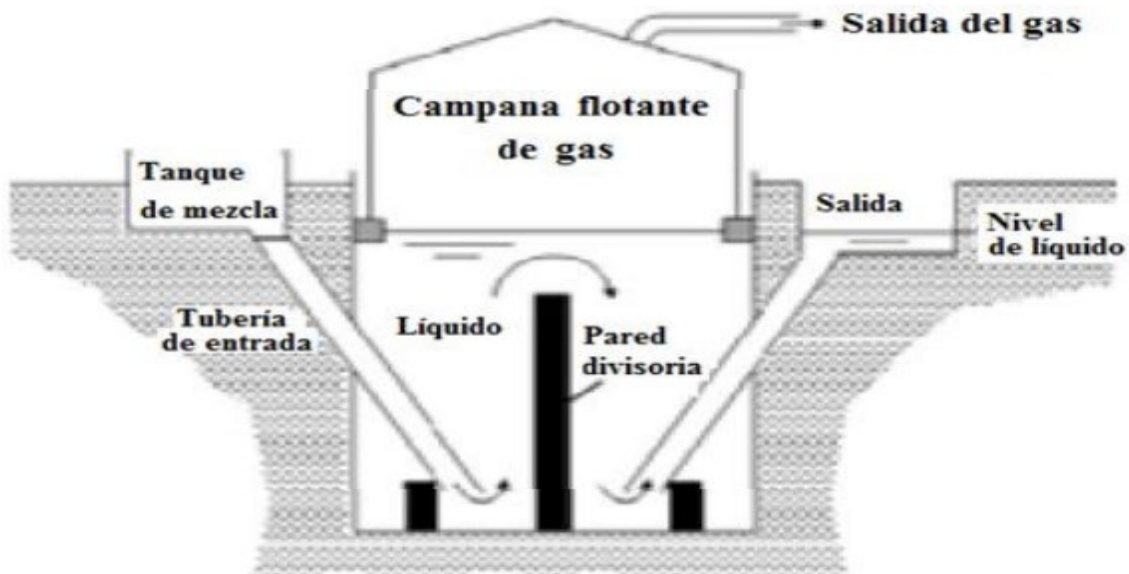
Tipos de biodigestores continuos más comerciales

- **Biodigestor de domo flotante (modelo indio)**, fue uno de los primeros modelos desarrollados en la India. Su estructura inicial incluía un tambor de acero, pero debido a los problemas de corrosión y altos costos de mantenimiento, este material fue reemplazado por plásticos reforzados con fibra de vidrio (FRP) u otros materiales resistentes. En este sistema, el biogás se almacena en una cúpula flotante que se eleva o desciende según la cantidad de

gas producido, manteniendo una presión de operación relativamente baja (entre 4–8 cm de columna de agua). La alimentación de biomasa se realiza mediante una tubería de entrada que facilita el flujo continuo de sustratos. Aunque sencillo, su principal limitación es la vida útil reducida por el desgaste del domo flotante (Bond & Templeton, 2011; Katuwal & Bohara, 2009).

Figura 3

Esquema de un biodigestor de campana flotante (modelo indio)

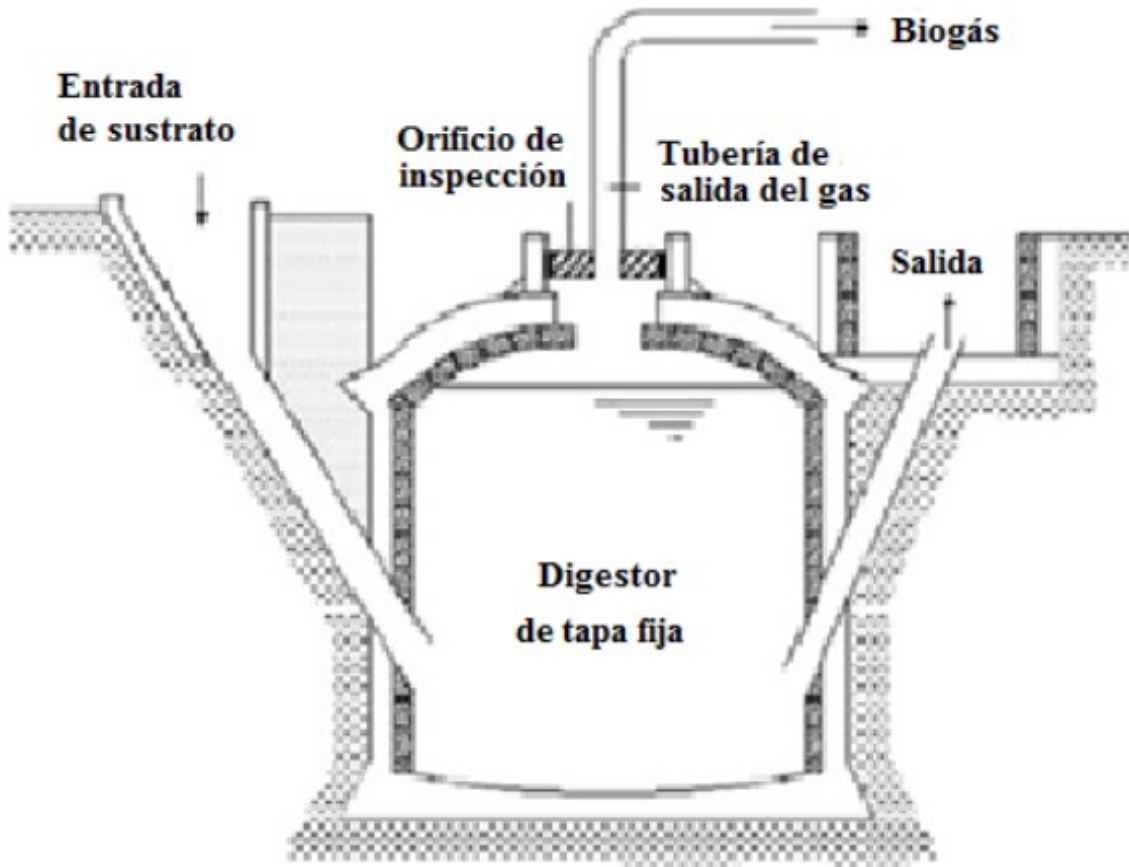


Nota. La figura muestra el funcionamiento del biodigestor de campana flotante, donde el gas se almacena en una campana móvil y se expulsa según la presión generada, destacando su sencillez operativa, aunque con menor durabilidad por el desgaste de la campana (Barrera-Cardoso et al., 2020).

- **Biodigestor de domo fijo (modelo chino)**, el biodigestor de cúpula fija fue ampliamente difundido en China desde la década de 1970. Se construye con ladrillos, piedra u hormigón, unidos con mortero impermeable. En este sistema, el domo de almacenamiento de biogás es parte de la estructura fija y no se mueve; el gas se acumula en su interior generando una presión de 1–1.5 m de columna de agua. Su principal ventaja radica en la durabilidad, ya que con un mantenimiento adecuado puede alcanzar una vida útil promedio de 20 años. Además, los costos de operación son bajos, aunque su construcción inicial requiere más mano de obra calificada y mayor inversión que los modelos flexibles (Rajendran et al., 2012; Garfí et al., 2016).

Figura 4

Esquema de un biodigestor de tapa fija (modelo chino)

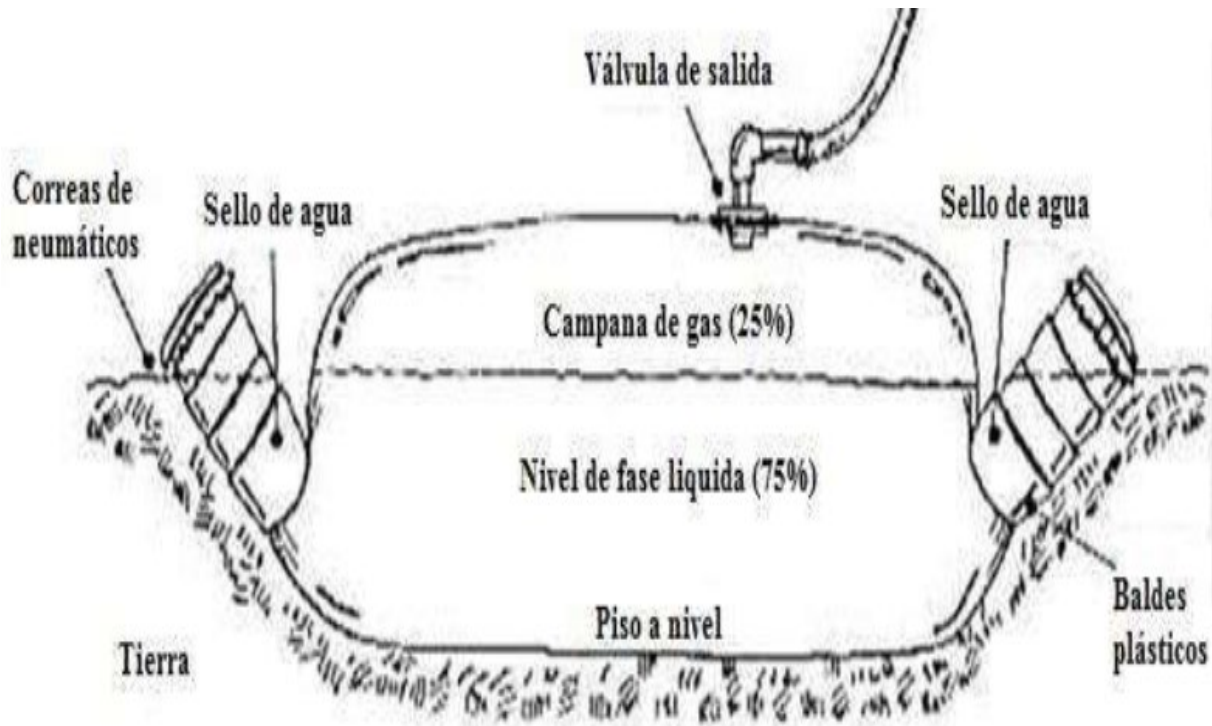


Nota. La figura muestra el biodigestor de tapa fija, compuesto por una cámara de digestión subterránea, entrada de sustrato, orificio de inspección, tubería de salida del gas y salida de efluentes; este modelo es robusto y duradero, aunque requiere mayor inversión y mano de obra especializada en su construcción (Barrera-Cardoso et al., 2020).

- **Biodigestor de estructura flexible (Tubular Taiwan)**, los biodigestores de membrana flexible surgieron como alternativa económica frente a los modelos de domo fijo o flotante. Inicialmente se fabricaron con nylon y neopreno, pero su costo elevado motivó la adopción de materiales más baratos y resistentes como el polietileno de alta densidad; estos sistemas son ligeros, fáciles de transportar e instalar, y almacenan el biogás en la parte superior de la bolsa o membrana; son especialmente utilizados en zonas rurales de bajos recursos, ya que permiten una producción básica de biogás a bajo costo, aunque presentan menor vida útil (5–10 años) y requieren mayor cuidado frente a perforaciones o exposición solar prolongada (Martí-Herrero et al., 2014; Cucina et al., 2021).

Figura 5

Esquema de un biodigestor de estructura flexible



Nota. La figura representa el biodigestor de estructura flexible, conformado por una membrana plástica que almacena el gas y el efluente líquido, con válvula de salida y sellos de agua en los extremos; este modelo destaca por su bajo costo y fácil instalación, siendo una alternativa económica frente a los biodigestores de domo fijo o flotante (Gatica et al., 2015).

La Tabla 6 presenta una comparación integral entre los modelos de biodigestores más utilizados: domo flotante, domo fijo y estructura flexible; se analizan criterios esenciales como el costo de construcción, la durabilidad del sistema, la presión de gas alcanzada, el nivel de mantenimiento requerido, así como sus aplicaciones típicas en distintos entornos; asimismo, se resaltan las ventajas particulares de cada diseño y las limitaciones que condicionan su implementación; esta sistematización permite identificar que mientras el biodigestor de domo fijo destaca por su gran durabilidad y robustez estructural, el modelo de domo flotante ofrece una presión de gas relativamente constante, aunque con mayores costos de mantenimiento; por otro lado, el biodigestor de estructura flexible se consolida como una alternativa económica y de fácil instalación, aunque más sensible a factores climáticos y a materiales pesados; en conjunto, la información comparativa resulta fundamental para orientar la selección del modelo más adecuado según las características socioeconómicas, técnicas y ambientales de las comunidades beneficiarias.

Tabla 6

Comparación de modelos de biodigestores continuos: domo flotante, domo fijo y estructura flexible

Criterio	Domo flotante (Indio)	Domo fijo (Chino)	Estructura flexible (Tubular Taiwan)
Costo de construcción	Moderado-alto (requiere acero o FRP; problemas de corrosión elevan el costo de mantenimiento).	Alto en la instalación inicial (ladrillo, hormigón, mortero impermeable).	Bajo; fabricado en polietileno o PVC de alta densidad, accesible en zonas rurales.
Durabilidad	Media (10–15 años con mantenimiento, pero sensible a la corrosión).	Alta (vida útil promedio de 20 años o más).	Media-baja (5–10 años, depende del material y la protección frente a rayos UV).
Presión de gas	Baja: 4–8 cm columna de agua.	Media: 1–1.5 m columna de agua.	Variable; depende de la resistencia del material, pero generalmente baja-media.
Mantenimiento	Requiere control periódico por corrosión y revisión del domo flotante.	Bajo; estructura robusta con pocas piezas móviles.	Alto riesgo de pinchazos o rasgado; requiere vigilancia y reparaciones simples.
Aplicaciones típicas	Domésticas y comunitarias en Asia rural (India, Nepal).	Comunidades rurales de Asia (China) y proyectos institucionales de larga duración.	Hogares rurales en América Latina y África; proyectos de cooperación de bajo costo.
Ventajas destacadas	Producción estable de gas y presión relativamente constante.	Gran durabilidad, baja dependencia de materiales importados.	Bajo costo, fácil instalación, portabilidad.
Limitaciones	Costos de reparación altos por corrosión; vida útil limitada del domo metálico.	Mayor inversión inicial y necesidad de albañilería calificada.	Menor vida útil; sensible a condiciones climáticas y materiales pesados.

Nota. La tabla presenta una comparación de los principales modelos de biodigestores según criterios técnicos y operativos, como costo de construcción, durabilidad, presión de gas, mantenimiento, aplicaciones, ventajas y limitaciones, permitiendo identificar sus características diferenciales y su aplicabilidad en distintos contextos rurales.

3.3.2.2. Biodigestores discontinuos

Los biodigestores discontinuos, también denominados de carga intermitente o batch, se caracterizan por un funcionamiento cíclico: el reactor se llena una sola vez con el sustrato

orgánico, se sella y se mantiene en operación hasta que la producción de biogás disminuye significativamente; en ese momento se descarga el digestato y se reinicia un nuevo ciclo con materia fresca; este esquema es particularmente útil en entornos industriales o rurales donde los residuos se generan de manera estacional o en campañas, y donde se busca un diseño de operación sencillo y de bajo costo, aunque con la limitación de caudales de gas variables y periodos sin producción (Harirchi et al., 2022).

En términos de eficiencia, la digestión anaerobia en modalidad discontinua suele requerir tiempos de retención hidráulica relativamente largos, que oscilan entre 20 y 40 días, para asegurar una completa estabilización de la materia orgánica y el establecimiento de comunidades metanogénicas estables (Harirchi et al., 2022; De Crescenzo et al., 2022); además, la producción de biogás sigue una curva típica de fase de arranque, máximo rendimiento y declive, lo que hace necesario el uso de varios reactores en paralelo para garantizar un suministro continuo (De Crescenzo et al., 2022).

Los rendimientos no deben expresarse únicamente por volumen de materia orgánica, sino por la fracción de sólidos volátiles degradados, parámetro más representativo en la literatura científica; estudios recientes han reportado que la digestión discontinua puede generar entre 0,1 y 0,9 m³ de biogás por kilogramo de sólidos volátiles (SV), con valores promedio alrededor de 0,3–0,6 m³/kg SV para estiércoles y residuos agroindustriales (Obileke et al., 2024); por ejemplo, Ulukardeşler et al. (2023) evidenciaron en codigestión de pasto y estiércol de vaca bajo condiciones mesofílicas en modo batch un rendimiento máximo de 331,75 mL de biogás y 206,64 mL de metano por gramo de SV; asimismo, Oladunni et al. (2025) demostraron que, optimizando la relación sustrato/inóculo y el tiempo de retención, se puede alcanzar un potencial de biometano de hasta 0,49 L CH₄/g SV en digestión discontinua de estiércol caprino.

En conjunto, la evidencia muestra que este tipo de biodigestores resulta apropiado cuando se prioriza la simplicidad y el bajo costo de operación, especialmente en contextos rurales o agroindustriales; no obstante, su desempeño óptimo depende de un adecuado dimensionamiento del tiempo de retención y del balance entre sustrato e inóculo, así como de la posibilidad de implementar reactores en paralelo para lograr un suministro más estable de energía (Obileke et al., 2024; Ulukardeşler et al., 2023).

Tabla 7*Ventajas y desventajas del biodigestor discontinuo*

Aspecto	Descripción	Referencia
Ventajas	Permite el uso de materiales secos y con alto contenido de sólidos (pasto, cáscaras de frutas, restos de cosecha, desechos alimenticios).	Obileke et al. (2024)
	No requiere alimentación diaria, lo que reduce la necesidad de mano de obra constante.	Harirchi et al. (2022)
	Construcción sencilla y con materiales de bajo costo, adecuada para comunidades rurales con recursos limitados.	Obileke et al. (2024)
Desventajas	El proceso de carga y descarga se hace por lotes completos, generando periodos de inactividad productiva.	De Crescenzo et al. (2022)
	Producción de biogás discontinua y variable, lo que dificulta un suministro energético estable.	UluKardeşler et al. (2023)
	Puede requerir varios reactores en paralelo para garantizar continuidad de producción.	Oladunni et al. (2025)
	Riesgo de acumulación de ácidos grasos volátiles e inhibición del proceso si no se controla la relación sustrato/inóculo.	Oladunni et al. (2025)

Nota. La tabla sintetiza los beneficios y limitaciones del biodigestor discontinuo, destacando su simplicidad y bajo costo frente a la dificultad de mantener una producción continua de biogás.

Ventajas del biodigestor discontinuo

Se caracteriza por su sencillez operativa y por admitir una amplia variedad de sustratos, incluso aquellos con alto contenido de sólidos, como pastos, cáscaras de frutas, restos de cosechas y desechos alimenticios; al no requerir una alimentación diaria, resulta una opción atractiva para pequeños productores o contextos rurales donde la disponibilidad de mano de obra es limitada; su construcción es menos compleja en comparación con los sistemas continuos, y puede funcionar con materiales de bajo costo, lo que lo convierte en una alternativa accesible para comunidades con recursos restringidos (Obileke et al., 2024; Harirchi et al., 2022).

Desventajas del biodigestor discontinuo

Sin embargo, este tipo de biodigestor presenta limitaciones importantes, el proceso de carga y descarga se realiza por lotes completos, lo que implica periodos de inactividad productiva durante la limpieza y recarga del sistema; esta característica genera una producción de biogás discontinua y variable, dificultando el suministro energético constante a lo largo del tiempo; además, requiere mayor espacio o el uso de varios reactores en paralelo si se busca

asegurar continuidad en la generación de energía; de igual modo, la operación por ciclos prolongados puede incrementar el riesgo de acumulación de ácidos grasos volátiles e inhibiciones si no se controla adecuadamente la relación sustrato/inóculo (De Crescenzo et al., 2022; Oladunni et al., 2025; Ulukardeşler et al., 2023).

Tabla 8

Comparación entre biodigestores continuos y discontinuos

Criterio	Biodigestor continuo	Biodigestor discontinuo
Modo de operación	Carga y descarga diaria o periódica; flujo constante de materia y biogás.	Se carga una sola vez con el sustrato; el digestor se sella y se espera la fermentación completa.
Producción de biogás	Estable y relativamente constante, siempre que se mantenga el balance de carga.	Fluctuante; alta al inicio y decrece hasta agotarse el sustrato.
Requerimiento de agua	Alto, debido a la necesidad de dilución adecuada del sustrato.	Menor, ya que no requiere flujo continuo de materia.
Mantenimiento	Sencillo, pero requiere supervisión diaria de la alimentación.	Bajo mantenimiento durante el ciclo, pero requiere limpieza exhaustiva tras vaciado.
Costo de instalación	Moderado; más adecuado para usos domésticos y comunitarios rurales.	Bajo; ideal para proyectos experimentales o de pequeña escala.
Ventajas	Producción continua de biogás. Fácil operación (control por cantidad de carga).	Construcción simple. Bajo costo inicial. Menor consumo de agua.
Desventajas	Mayor consumo de agua. No incluye agitador, problemas con sustratos densos. Posible sedimentación.	Producción intermitente. Requiere mayor volumen útil. Necesidad de múltiples reactores para asegurar continuidad.
Aplicaciones típicas	Viviendas rurales, pequeñas granjas, comunidades con acceso a estiércol y agua.	Laboratorios, proyectos educativos, ensayos experimentales o zonas con poco consumo de gas.

Nota. La tabla resume las diferencias técnicas y operativas entre los biodigestores continuos y discontinuos, destacando sus ventajas, limitaciones y contextos de aplicación.

3.3.3. Selección del tipo de biodigestor

3.3.3.1. Criterios de evaluación para la selección del biodigestor

Costo de instalación

Este criterio evalúa la inversión inicial necesaria para la construcción e implementación del biodigestor; incluye no solo el precio de los materiales principales (cemento, ladrillos, acero, geomembrana, tuberías), sino también la mano de obra especializada requerida, los costos de transporte de materiales hasta el fundo y los gastos de adaptación del terreno; un menor costo de instalación aumenta la factibilidad económica del proyecto, especialmente en contextos rurales con recursos limitados (Obileke et al., 2024).

Mantenimiento y operación

Considera la frecuencia, complejidad y costo de las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo; un biodigestor que demande inspecciones frecuentes, repuestos costosos o mano de obra especializada incrementa el riesgo de fallas operativas en zonas rurales; también se analiza la facilidad de operación cotidiana: carga del sustrato, control de pH y temperatura, limpieza y manejo del efluente; sistemas más sencillos de operar y con bajo mantenimiento son preferibles para comunidades que carecen de personal técnico capacitado (Harirchi et al., 2022).

Durabilidad y vida útil

Evalúa el tiempo estimado de servicio del biodigestor en condiciones rurales, considerando la resistencia de los materiales a la corrosión, a la radiación UV, a las lluvias intensas y a la presión del gas; por ejemplo, un biodigestor de domo fijo puede superar los 20 años, mientras que uno tubular flexible suele tener entre 5 y 10 años de vida útil si no se protege con techo o zanja; este criterio es clave para medir la sostenibilidad de la inversión en el tiempo (De Crescenzo et al., 2022).

Rendimiento y estabilidad del gas

Hace referencia a la capacidad del biodigestor para mantener una producción continua, estable y con buena presión de biogás; se valora la eficiencia de conversión de la biomasa en metano, la constancia del flujo y la presión suficiente para alimentar cocinas, motores o generadores eléctricos; biodigestores que aseguren un caudal uniforme reducen la necesidad de sistemas de almacenamiento o compresión adicionales (Ulukardeşler et al., 2023).

Facilidad constructiva y disponibilidad de materiales locales

Analiza la simplicidad del proceso de construcción y la posibilidad de utilizar materiales disponibles en la zona (arena, cemento, plásticos, geomembranas); también se mide el grado de especialización requerido en la mano de obra: mientras el modelo chino necesita albañiles experimentados, el modelo Taiwán puede instalarse con capacitación básica; este criterio es clave en proyectos rurales donde se busca autonomía local y reducción de la dependencia externa (Oladunni et al., 2025).

Seguridad y tiempo de implementación

Incluye la rapidez con la que puede instalarse el biodigestor y la seguridad estructural del sistema durante su operación; se consideran riesgos como fugas de biogás, explosiones, daños mecánicos por animales o vandalismo, y exposición prolongada a radiación solar; además, la velocidad de implementación es vital para responder a demandas inmediatas de energía en comunidades que carecen de suministro eléctrico estable; por ello, se prefieren sistemas seguros, fáciles de proteger con zanjas o techos livianos, y que puedan instalarse en plazos cortos (Obileke et al., 2024).

La selección del tipo de biodigestor más adecuado para el Fundo Nuevo Mundo, Imaza – Amazonas, requiere de un análisis integral que considere no solo la eficiencia técnica del sistema, sino también su viabilidad económica, social y ambiental en el contexto rural amazónico; para este propósito se establecieron criterios de evaluación que permiten comparar de manera objetiva las alternativas tecnológicas disponibles; estos criterios fueron definidos a partir de la revisión de literatura científica reciente y de estudios aplicados en biodigestores en contextos similares, lo cual asegura un marco de análisis riguroso y validado; en la Tabla 9 se presentan los criterios seleccionados, su descripción y las referencias que respaldan su pertinencia en la toma de decisiones sobre tecnologías de biogás.

3.3.3.2. Matriz de enfrentamiento de criterios

La Matriz de Enfrentamiento de Criterios constituye una herramienta metodológica fundamental para seleccionar el tipo de biodigestor más adecuado al contexto del Fundo Nuevo Mundo, Imaza – Amazonas; su utilidad radica en que permite comparar de manera sistemática los criterios previamente definidos (costo de instalación, mantenimiento y operación, durabilidad, rendimiento, facilidad constructiva y seguridad), asignándoles un peso relativo en

función de su importancia; a través de esta técnica se obtiene una ponderación porcentual que orienta la toma de decisiones, reduciendo la subjetividad y garantizando que la elección se sustente en un análisis estructurado y transparente.

Tabla 9

Criterios de selección de biodigestores

Criterio	Descripción	Referencia de respaldo
Costo de instalación	Evalúa la inversión inicial requerida para implementar el biodigestor, considerando materiales, transporte y mano de obra. Un menor costo favorece la adopción en comunidades rurales.	Obileke et al. (2024)
Mantenimiento/operación	Considera la frecuencia y complejidad del mantenimiento y la facilidad de operación diaria (carga, control de pH y limpieza). Sistemas más simples reducen el riesgo de fallas.	Harirchi et al. (2022)
Durabilidad/vida útil	Analiza la resistencia del sistema y los materiales frente a condiciones climáticas y de operación, lo que determina los años de servicio del biodigestor.	De Crescenzo et al. (2022)
Rendimiento/estabilidad del gas	Evalúa la capacidad de mantener una producción constante y de buena presión de biogás, reduciendo variaciones en el suministro energético.	Ulukardeşler et al. (2023)
Facilidad constructiva/materiales locales	Mide la simplicidad de construcción y la disponibilidad de materiales locales, así como la necesidad de mano de obra especializada.	Oladunni et al. (2025)
Seguridad y tiempo de implementación	Incluye la rapidez de instalación y los riesgos asociados a la operación (fugas, exposición solar, daños mecánicos). Sistemas más seguros y rápidos de implementar son preferidos en contextos rurales.	Obileke et al. (2024)

Nota. La tabla presenta los criterios empleados para la selección del tipo de biodigestor, describiendo su alcance técnico y operativo, y sustentando cada dimensión con referencias científicas recientes; esta sistematización permite fundamentar la decisión tecnológica en función de aspectos económicos, constructivos, de operación y de seguridad.

La matriz de enfrentamiento (Tabla 10) aplicada permitió jerarquizar los criterios de selección del biodigestor en función de su relevancia técnica, económica y operativa para el Fundo Nuevo Mundo, Imaza – Amazonas, los resultados muestran que el costo de instalación (25%) constituye el factor de mayor peso, lo cual es coherente con la realidad socioeconómica del proyecto: la inversión inicial es determinante en zonas rurales con recursos limitados, y la elección de una tecnología más accesible garantiza viabilidad financiera y menor riesgo de abandono.

El segundo criterio en importancia es el mantenimiento y operación (20%), que refleja la necesidad de contar con un sistema que no demande mano de obra altamente especializada ni insumos costosos; en comunidades rurales, la capacidad de los usuarios para realizar labores básicas de mantenimiento resulta clave para asegurar la sostenibilidad del sistema; le siguen en importancia la durabilidad/vida útil (15%), el rendimiento y estabilidad del gas (15%) y la facilidad constructiva/materiales locales (15%); estos factores guardan una relación directa con la disponibilidad de materiales en la región, la resistencia de la infraestructura frente a las condiciones climáticas amazónicas y la garantía de un suministro de energía confiable y constante.

Finalmente, el criterio de seguridad y tiempo de implementación (10%) obtuvo un peso relativamente menor, aunque sigue siendo relevante; su inclusión responde a la necesidad de instalar un sistema que pueda entrar en operación en plazos breves, con condiciones mínimas de riesgo para los operadores y el entorno; en conjunto, los pesos obtenidos reflejan una priorización balanceada entre la viabilidad económica y la sostenibilidad técnica del biodigestor, ajustada al contexto del fundo y a las necesidades energéticas identificadas.

La matriz evidencia que el costo de instalación (25%) y el mantenimiento/operación (20%) son los criterios de mayor relevancia en el contexto amazónico, donde los recursos económicos son limitados y la sostenibilidad depende de la simplicidad operativa; la durabilidad, rendimiento y facilidad constructiva comparten un peso intermedio (15% cada uno), reflejando la necesidad de un equilibrio entre eficiencia técnica y uso de materiales locales; finalmente, la seguridad y el tiempo de implementación (10%) se consideran esenciales, aunque con menor peso relativo, dado que si bien son importantes para la viabilidad inicial, no definen por sí solos la sostenibilidad a largo plazo del sistema.

Tabla 10*Matriz de enfrentamiento de criterios*

Factor	Abrev.	CI	MO	DV	RG	FC	SG	Total	Ponderación (%)
Costo de instalación	CI	X	2	2	2	2	2	10	25.0
Mantenimiento/operación	MO	0	X	2	2	2	2	8	20.0
Durabilidad/vida útil	DV	0	0	X	1	1	2	4	15.0
Rendimiento/estabilidad del gas	RG	0	0	1	X	1	2	4	15.0
Facilidad constructiva/materiales locales	FC	0	0	1	1	X	2	4	15.0
Seguridad y tiempo de implementación	SG	0	1	1	0	0	X	2	10.0

Nota. En la matriz de enfrentamiento los valores asignados responden a un criterio comparativo de importancia relativa entre factores; el valor 2 indica que el criterio de la fila tiene mayor importancia frente al criterio de la columna; el valor 1 refleja un empate o igualdad en relevancia entre ambos criterios; y el valor 0 señala que el criterio de la fila es considerado de menor importancia respecto al de la columna.

3.3.3.3. Método de factores ponderados para la selección del biodigestor

Se aplicó un esquema de decisión multicriterio (ponderación simple) con criterios adaptados al contexto rural amazónico: costo de instalación y reposición, mantenimiento y operación, durabilidad, rendimiento/estabilidad del gas, facilidad constructiva y disponibilidad de materiales locales, seguridad y tiempo de implementación.

Alternativas evaluadas

- Chino (domo fijo, enterrado). Muy durable (>20 años), bajo mantenimiento y buena presión de gas; pero requiere obra de albañilería calificada y mayor CAPEX (inversión inicial de capital); adecuado cuando se busca vida útil larga y se dispone de mano de obra especializada.

- Indio (cúpula flotante). Inversión alta por la campana de acero y mantenimiento exigente por corrosión; sensible a residuos fibrosos; poco aconsejable para ambientes húmedos si el mantenimiento no será permanente.
- Taiwán (tubular/flexible continuo). Bajo costo, instalación rápida y operación sencilla; vida útil menor (5–10 años) y requiere protección UV/animales (zanjas/techo); muy apropiado para zonas rurales de bajos recursos si se añaden medidas de protección.

La selección del biodigestor se sustentó en una matriz multicriterio ponderada considerando las condiciones del Fundo Nuevo Mundo (Imaza): clima cálido-húmedo, accesos por carretera con transporte liviano, mano de obra no especializada, restricción presupuestal y preferencia por operación a baja presión, lo que prioriza soluciones flexibles, de montaje in situ y bajo CAPEX; en coherencia con ello, se mantuvieron los criterios y pesos de la Tabla 11: Costo de instalación (25 %), Mantenimiento/operación (20 %), Durabilidad/vida útil (15 %), Rendimiento/estabilidad del gas (15 %), Facilidad constructiva/materiales locales (15 %) y Seguridad y tiempo de implementación (10 %); estos pesos reflejan: i) la restricción presupuestal (mayor peso a costo total); ii) la necesidad de sostenibilidad operativa con personal local (peso elevado a O&M); iii) la robustez y vida útil del sistema (durabilidad y estabilidad del proceso); iv) la constructibilidad con materiales accesibles y mínima obra civil; y v) la seguridad y rapidez de despliegue en un entorno rural. Bajo esta ponderación, el biodigestor tubular/flexible (tipo Taiwán) obtiene el puntaje global más alto en la matriz, por su bajo costo, facilidad de montaje, operación sencilla y baja presión, atributos que se alinean con el contexto de Imaza.

La matriz de evaluación ponderada (Tabla 11) evidencia que, tras asignar las ponderaciones y calificaciones a los distintos criterios, el biodigestor tipo Taiwán (3,95) alcanza el puntaje global más alto, seguido por el Chino (3,85) y finalmente el Indio (2,85), esto significa que, en el contexto del Fundo Nuevo Mundo – Imaza, Amazonas, la tecnología Taiwán resulta la opción más adecuada para garantizar viabilidad técnica, económica y operativa; el biodigestor Taiwán sobresale principalmente en costo de instalación (1,25) y en facilidad constructiva con materiales locales (0,75), lo que refleja su menor inversión inicial y la posibilidad de implementarlo con recursos disponibles en la zona, además, obtiene calificaciones intermedias en mantenimiento/operación (0,8) y seguridad (0,4), lo cual refuerza su conveniencia en un entorno rural con limitaciones técnicas.

Tabla 11*Matriz de evaluación ponderada de criterios para la selección del biodigestor*

Criterios	Ponderación	Tipo de biodigestor					
	(%)	Chino	Indio	Taiwán			
Costo de instalación	25	3	0.75	2	0.50	5	1.25
Mantenimiento/operación	20	5	1.00	2	0.40	4	0.8
Durabilidad/vida útil	15	5	0.75	4	0.60	2	0.3
Rendimiento/estabilidad del gas	15	4	0.60	4	0.60	3	0.45
Facilidad constructiva/materiales locales	15	3	0.45	3	0.45	5	0.75
Seguridad y tiempo de implementación	10	3	0.30	3	0.30	4	0.4
Total	100 %		3.85		2.85		3.95

Nota. La tabla presenta la ponderación de cada criterio (en %) y la calificación asignada a los tres tipos de biodigestores (Chino, Indio y Taiwán); las calificaciones se otorgaron en una escala de 1 a 5, donde 1 representa un desempeño muy bajo respecto al criterio evaluado y 5 un desempeño muy alto: los valores intermedios (2, 3 y 4) reflejan niveles progresivos de cumplimiento parcial.

El biodigestor Chino presenta un desempeño muy cercano (3,85), destacando en durabilidad (0,75) y mantenimiento (1,0), pero con una mayor exigencia en términos de costo de instalación (0,75) y disponibilidad de materiales locales (0,45), lo que limita su factibilidad inmediata; por otro lado, el biodigestor Indio obtiene el puntaje más bajo (2,85), debido a que sus calificaciones son inferiores en la mayoría de los criterios, lo cual refleja menor compatibilidad con las condiciones del proyecto.

En conclusión, la selección de la tecnología Taiwán se justifica por su equilibrio entre bajo costo, facilidad constructiva y aceptable rendimiento operativo, convirtiéndose en la alternativa más viable para atender las necesidades energéticas de la zona rural en estudio.

Decisión: Biodigestor Tubular tipo Taiwán (continuo, flexible).

Justificación técnica:

1. Costo–beneficio favorable para cubrir 5,72 kWh/día con margen de gas, minimizando la inversión inicial y el riesgo financiero del proyecto.
2. Operación continua y sencilla, adecuada para el personal del fundo (carga diaria, salida de digestato y gas estables).
3. Disponibilidad y montaje rápidos con materiales locales; se recomienda instalar en zanja somera con techo liviano y cerco para mitigar radiación UV, pinchazos y daño por animales.
4. El dimensionamiento calculado ($TRH \approx 20$ d para estiércol vacuno; $V \approx 24,38$ m³) encaja naturalmente con un tubular continuo.

3.3.4. Componentes del sistema de biodigestor seleccionado

3.3.4.1. Sistema Biobolsa

El Sistema Biobolsa, desarrollado por Sistema.bio, constituye un biodigestor tubular de polietileno flexible, disponible en once modelos comerciales con capacidades líquidas de 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 25, 30 y 40 m³; esta variedad permite su aplicación en diferentes escalas productivas, desde pequeñas unidades familiares hasta explotaciones agropecuarias de mayor envergadura (Engineering for Change, 2023), entre sus características se tiene:

1. Modularidad y escalabilidad

El carácter modular del sistema Biobolsa permite interconectar múltiples unidades para responder a necesidades mayores de procesamiento y producción energética, tanto térmica como mecánica o eléctrica (Sistema.bio, 2023).

2. Impacto ambiental y social

Estudios recientes destacan que Biobolsa transforma residuos orgánicos en energía renovable y biofertilizante, lo cual contribuye a reducir gases de efecto invernadero, mitigar la contaminación del suelo y agua, y mejorar la seguridad energética y productiva en comunidades rurales; este alineamiento con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la economía circular subraya su valor más allá del puramente técnico (Sistema.bio, 2023).

3. Rendimiento operativo

El sistema ha demostrado generar suficientes volúmenes de biogás para satisfacer necesidades domésticas o agrícolas, dependiendo del clima: por ejemplo, en climas cálidos, un modelo de 40 m³ puede producir hasta 14.6 m³ de biogás por día (Sistema.bio, 2023).

De acuerdo con los cálculos realizados en el presente estudio, el propio dimensionamiento fija un volumen mínimo del digestor de 24,38 m³ con TRH = 20 días y caudal afluente de 1,219 m³/día; por norma de diseño, se elige el tamaño comercial inmediatamente superior al mínimo calculado en este caso 25 m³; sin embargo, se selecciona el modelo BB30 (30 m³), cuya capacidad asegura un adecuado tiempo de retención hidráulico (TRH), evitando sobrecargas y otorgando estabilidad al proceso de biodigestión (picos de carga, variación de temperatura/mezcla, mantenimiento); o se prevé ampliar la alimentación en el corto plazo. Si en época fría se sube a TRH=24 días, el volumen requerido sería 29.3 m³, lo que justifica muy bien elegir un BB30 (30 m³) como margen de seguridad estacional, lo que aporta holgura térmica y operacional

Tabla 12

Dimensiones de zanja recomendadas para modelos de Biobolsa

Modelo	Capacidad útil (m ³)	Longitud de zanja (m)	Ancho de zanja (m)	Profundidad (m)	Observaciones
BB4	4 m ³	5.8 m	1.20 m	1.00 m	Adecuado para pequeñas familias o productores con pocas cabezas de ganado.
BB25	25 m ³	14–15 m	1.70 m	1.20 m	Recomendada para medianos productores.
BB30	30 m ³	16–17 m	1.70–2.00 m	1.20–1.30 m	Proporciona holgura operativa, mayor TRH y estabilidad térmica.

Nota. Las medidas pueden variar ligeramente según el manual de instalación, condiciones del suelo y clima (Sistema.bio, 2024).

Este biodigestor está elaborado con geomembrana de polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) con aditivo ultravioleta (UV), lo que incrementa su resistencia y prolonga su vida útil frente a la radiación solar; la membrana de LLDPE utilizada en la Biobolsa ha sido sometida a pruebas específicas bajo radiación UV, lo que ha permitido estimar una vida útil prolongada,

incluso superior a varios decenios, en algunos casos, se reporta una durabilidad esperada de hasta 50 años, dependiendo del contexto de uso y el mantenimiento realizado (Sistema.bio, 2024).

El BB30 requiere una zanja de aproximadamente 16–17 metros de longitud (Tabla 12), 1,7–2,0 metros de ancho y 1,2–1,3 metros de profundidad; de esa longitud total, alrededor de 14–15 metros se destinan a la mezcla y digestión anaeróbica de estiércol y agua, mientras que en cada extremo se disponen cerca de 1 metro para el acoplamiento del tubo de PVC de entrada y 1 metro para la salida del digestato (Figura 5), lo que garantiza un flujo continuo y un proceso eficiente; esta configuración a gran escala permite manejar mayores volúmenes de carga, generando suficiente biogás para aplicaciones domésticas y agroindustriales, además de biofertilizante orgánico de calidad (Sistema.bio, 2024).

Por otro lado, es recomendable que el biodigestor cuente con protección estructural y térmica; una medida práctica consiste en levantar un borde o base perimetral con ladrillo King Kong ($21 \times 7 \times 6,5$ cm), lo que contribuye a mitigar las pérdidas de temperatura causadas por el viento y previene movimientos o rotaciones de la Biobolsa; es importante aclarar que dichas dimensiones corresponden al ladrillo empleado en el aislamiento, y no a la zanja de instalación, cuyas medidas se ajustan a lo establecido por las especificaciones técnicas del fabricante (Sistema.bio, 2024).

La elección del BB30 responde tanto a las necesidades de capacidad calculadas en este proyecto como a criterios de durabilidad, seguridad operativa y sostenibilidad ambiental, permitiendo transformar residuos pecuarios en energía renovable y fertilizante orgánico, contribuyendo así a reducir emisiones contaminantes, disminuir el uso de combustibles fósiles y fortalecer la economía circular en el sector agropecuario (Sistema.bio, 2024).

El sistema demuestra gran versatilidad, permitiendo interconectar varias unidades para ampliar su capacidad de tratamiento y producción energética (ya sea biogás térmico, mecánico o incluso eléctrico) lo que lo hace adaptable a proyectos agrícolas de diversa envergadura; además, investigaciones recientes destacan su impacto positivo en comunidades rurales: la generación de energía limpia, la reducción de emisiones y la creación de fertilizante orgánico (Figura 6) mejoran significativamente los resultados productivos y ambientales (Sistema.bio, 2024).; en 2023, la Organización EstrategHaz reportó que la implementación de Biobolsa en comunidades latinoamericanas ha permitido sustituir el consumo de combustibles fósiles por biogás y mejorar los ingresos de las familias productoras al disponer de biofertilizantes orgánicos que sustituyen a los químicos de alto costo (EstrategHaz, 2023).

Figura 6

Biodigestor tubular Sistema Biobolsa



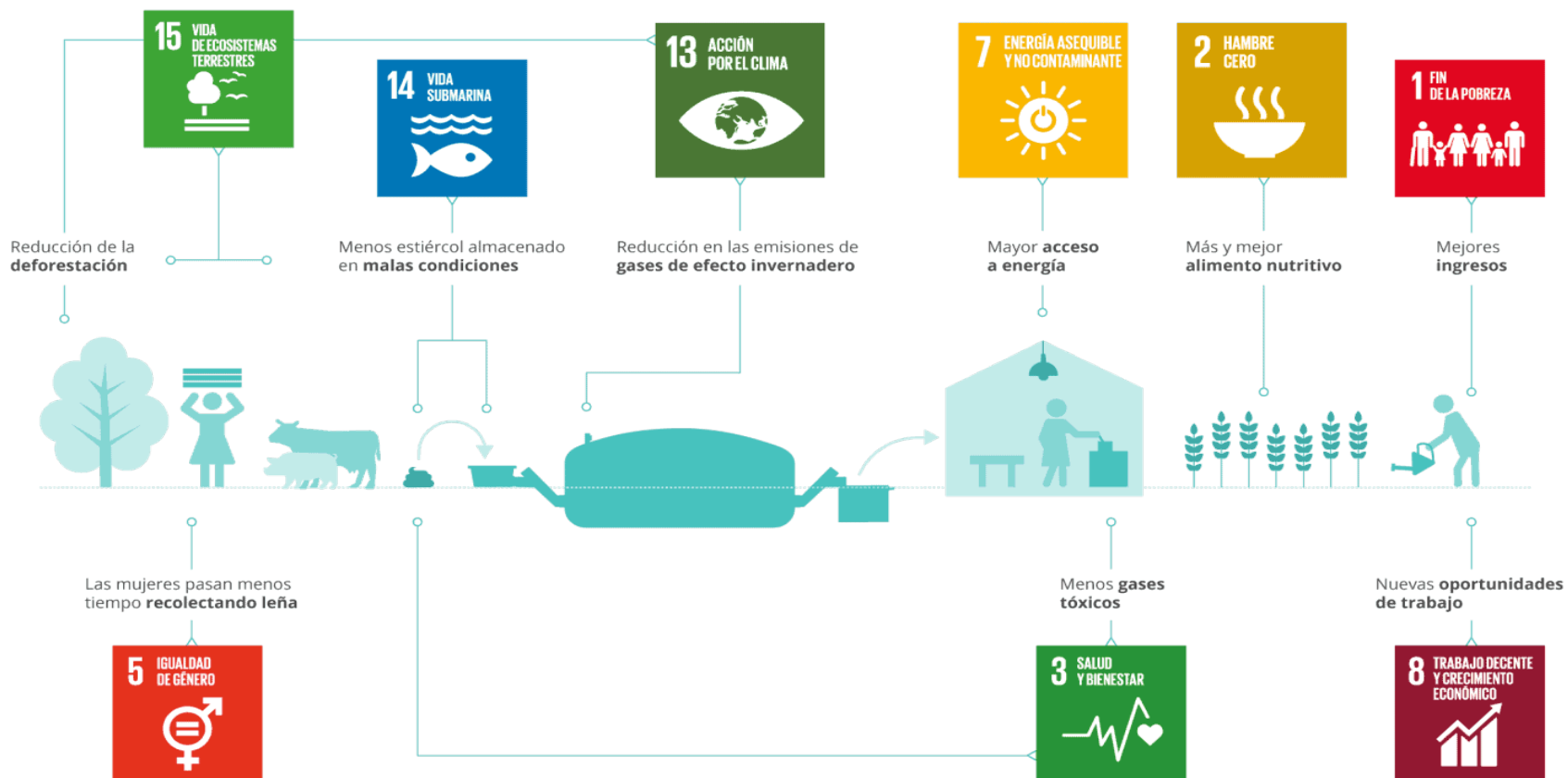
Nota. La imagen muestra la instalación de un biodigestor tubular de polietileno (modelo Sistema Biobolsa), dispuesto en una zanja.

3.3.4.2. Tubo de entrada para mezcla de estiércol y agua

El tubo de entrada del biodigestor BB30 cumple la función de conducir la mezcla de estiércol y agua hacia el interior del sistema, garantizando un suministro estable del sustrato para la digestión anaerobia; para este fin se instala un tubo de PVC de 4 pulgadas de diámetro, marca Pavco, con una longitud aproximada de un metro, que conecta directamente la tolva de alimentación con la cámara de digestión; la instalación del tubo debe realizarse con uniones herméticas selladas con adhesivo para PVC y abrazaderas metálicas, a fin de evitar fugas y pérdidas de presión; el extremo de descarga se coloca sumergido entre 10 y 15 centímetros por debajo del nivel del líquido en el biodigestor, de modo que el propio fluido actúe como sello hidráulico y prevenga cualquier escape de biogás hacia el exterior (Sistema.bio, 2023).

Figura 7

Contribución de los biodigestores Biobolsa al cumplimiento de los ODS



Nota. El esquema muestra los impactos positivos del uso de biodigestores en relación con los ODS (Sistema.bio, 2023).

Para facilitar las operaciones de mantenimiento, la línea de entrada incorpora un registro de inspección con tapa desmontable, que permite limpiar la tubería en caso de obstrucciones. Asimismo, en la tolva de mezcla se coloca una rejilla metálica para retener piedras, fibras largas u otros sólidos que puedan obstruir la conducción; esta disposición asegura un flujo continuo de materia orgánica, evita la acumulación de residuos y mantiene la eficiencia del sistema (FAO, 2024); en términos operativos, el tubo de entrada debe mantenerse en condiciones de limpieza permanente, para ello, se recomienda la revisión semanal del registro de inspección y la rejilla de la tolva, con el fin de retirar materiales sólidos retenidos; con esta configuración, el sistema garantiza una alimentación segura, uniforme y libre de fugas, optimizando el proceso de biodigestión en el BB30.

3.3.4.3. Tubo de salida del digestato

El tubo de salida es el conducto encargado de evacuar el digestato generado durante el proceso de biodigestión; en el sistema BB30 se implementa con tubería de PVC de 4", con uniones herméticas selladas con adhesivo industrial y abrazaderas de acero; su instalación debe realizarse al nivel de la superficie del fluido en el biodigestor, lo que permite mantener el equilibrio hidráulico y evita que el biogás escape por esta vía; el digestato se canaliza hacia un tanque de almacenamiento externo impermeabilizado, desde donde puede utilizarse como biofertilizante líquido o someterse a procesos de separación sólido-líquido mediante lechos de secado o filtros mecánicos, esta práctica se reconoce como una estrategia eficiente para valorizar nutrientes y reducir impactos ambientales en la agricultura (Mapantsela et al., 2024).

3.3.4.4. Línea de conducción de biogás

El biogás producido se conduce a través de una tubería superior de PVC de 2", instalada con una pendiente mínima de 1–2 % para garantizar el drenaje natural de condensados; en los puntos bajos de la conducción se colocan trampas de condensado provistas de válvulas de purga, lo que previene bloqueos y corrosión en el sistema; la tubería debe estar protegida con abrazaderas metálicas, evitando curvaturas innecesarias que generen pérdidas de presión; según estudios recientes, el diseño de líneas de biogás con trampas de condensado y pendientes controladas es esencial para mejorar la seguridad y eficiencia de operación en plantas de digestión anaerobia (Josimović et al., 2024). La toma de gas se ubica en la parte superior de la biobolsa (zona de acumulación de metano) y se conecta a una línea de conducción de 2" de diámetro; se instala un tramo inicial de acople próximo al digestor y se continúa hasta el punto

de uso (generador), definiendo la longitud total según el trazado, con pendiente 1–2 % y trampas de condensado en los puntos bajos; la conducción se ejecuta preferentemente en PE (Polietileno)/HDPE(Polietileno de Alta Densidad) para gas (SDR11- significa que el diámetro exterior es 11 veces mayor que el espesor de la pared, mientras menor sea el número SDR, más gruesa y resistente es la pared de la tubería) o, en su defecto, PVC de presión debidamente protegido bajo techo; se minimiza el número de codos y se soporta cada 1–1.5 m.

3.3.4.5. Filtro de biogás (H₂S)

El biogás crudo contiene sulfuro de hidrógeno (H₂S), gas corrosivo que puede deteriorar tuberías, válvulas y motores eléctricos; para el BB30 se emplea un filtro de biogás conectado en la línea principal, compuesto por un cilindro relleno de material adsorbente (carbón activado, viruta de hierro o biochar; este dispositivo está diseñado para remover el H₂S antes de que el biogás llegue al generador o al punto de consumo, prolongando así la vida útil de los equipos; investigaciones recientes han demostrado que el uso de filtros bioquímicos con medios adsorbentes es capaz de remover hasta un 95–99 % de H₂S, reduciendo de manera significativa los riesgos de corrosión y emisiones tóxicas (Mohammadi et al., 2025).

El filtro de biogás cumple una función esencial dentro del sistema, ya que está diseñado para eliminar el sulfuro de hidrógeno (H₂S) presente en el gas (Figura 7), este compuesto, además de provocar un olor desagradable, es altamente corrosivo y puede deteriorar tuberías, válvulas, generadores eléctricos y otros equipos conectados a la red de biogás; el dispositivo se compone de un cuerpo cilíndrico provisto de una tuerca de unión que facilita el acceso al material filtrante interno, lo que permite reemplazarlo periódicamente de manera sencilla; asimismo, cuenta con espigas en ambos extremos que posibilitan su rápida instalación en cualquier punto de la línea de conducción (Ehouman et al., 2023).

El correcto funcionamiento del filtro depende de su ubicación estratégica y de un mantenimiento oportuno; el material filtrante debe renovarse aproximadamente cada mes, motivo por el cual se recomienda instalar el dispositivo en un lugar visible y accesible para el operador; además, resulta conveniente situarlo junto a los demás componentes del sistema (como la válvula de alivio o la trampa de condensados) con el fin de concentrar las labores de inspección y mantenimiento en una misma zona (Ehouman et al., 2023).

Para mantener su eficacia operativa, el filtro debe ubicarse en un lugar visible y de fácil acceso, ya que el medio filtrante requiere renovación aproximadamente cada mes; además, se recomienda instalarlo junto a otros componentes de mantenimiento frecuente, como las trampas

de condensado o la válvula de alivio, consolidando los puntos de inspección en una zona común; la eficiencia del filtro se ve optimizada si se instala en un tramo con ligera pendiente, evitando la acumulación de agua en su interior, lo que garantizaría un flujo continuo del gas y prevendría posibles obstrucciones (Ehouman et al., 2023).

El procedimiento de instalación es relativamente sencillo, primero se identifica el punto de la línea de gas donde se insertará el filtro y se realiza un corte en el tramo correspondiente, luego, se colocan las espigas del filtro en los extremos de la tubería y se fijan firmemente con abrazaderas metálicas, finalmente, se verifica que el dispositivo se encuentre correctamente ajustado y en posición adecuada para iniciar su operación; con estas medidas, se asegura una purificación eficiente del biogás, lo que contribuye a la durabilidad de los equipos, la seguridad del sistema y la calidad del gas producido (Ehouman et al., 2023).

3.3.4.6. Dispositivo de seguridad (válvula de alivio)

El BB30 debe contar con un dispositivo de seguridad tipo sello hidráulico o válvula de alivio, cuya función es liberar el exceso de presión interna para evitar rupturas de la geomembrana; el sistema consiste en un recipiente con agua (Bidón 30 cm alto × 20 cm de diámetro con capacidad $\geq 5-10$ L para evitar evaporación rápida y salpicaduras) en el que se introduce el extremo de una tubería; cuando la presión del biodigestor supera la columna de agua (10–12 cm) (estableciendo una presión de alivio de aproximadamente 9,8 mbar), el gas es liberado de forma automática; este mecanismo sencillo y confiable asegura que el biodigestor opere en condiciones seguras, evitando acumulaciones peligrosas de gas; estudios de seguridad en plantas de biogás destacan la importancia de este tipo de dispositivos para reducir riesgos de explosión y mantener condiciones operativas estables (Hegazy et al., 2024).

3.3.4.7. Llaves de paso (principal, secundaria y de llegada)

La red de conducción de gas del BB30 debe incorporar tres válvulas estratégicamente ubicadas:

- La llave principal, situada inmediatamente después de la salida de biogás del digestor, controla el flujo total.
- La llave secundaria, ubicada tras la derivación hacia la válvula de alivio, asegura que siempre exista una vía de escape para el gas.
- La llave de llegada, instalada en el punto de consumo (generador o cocina), regula el ingreso final del biogás.

Estas llaves deben ser de latón o bronce con rosca metálica, materiales resistentes a la acción corrosiva del metano y el H_2S , garantizando hermeticidad y durabilidad; el uso de válvulas adecuadas y su correcta disposición es señalado como un factor clave para la operación segura de biodigestores en estudios técnicos recientes (Mapantsela et al., 2024).

Figura 8

Filtro de biogás (H_2S)



Nota. Dispositivo instalado en la línea de conducción que elimina el sulfuro de hidrógeno (H_2S), protegiendo los equipos y mejorando la calidad del biogás (Ehouman et al., 2023).

En la instalación del sistema BB30 se emplearán accesorios que aseguran la conducción adecuada del biogás y la protección del biodigestor; se utilizan adaptadores de PVC de 2" (macho y hembra) para facilitar el acoplamiento de tramos de tubería y desmontajes de mantenimiento, así como arandelas de caucho y abrazaderas metálicas de 3" y 5" que garantizan la hermeticidad en uniones críticas; la instalación contempla también una T de 2", destinada a la derivación hacia la válvula de alivio, lo que asegura la liberación de presión en condiciones seguras; asimismo, se emplean codos de PVC de 2" para redireccionar la tubería, recomendándose minimizar su uso y sustituir codos de 90° por dos de 45°, con el fin de reducir pérdidas de presión, no obstante, para una mayor durabilidad se sugiere sustituir las juntas de caucho tradicionales por juntas de EPDM o nitrilo (NBR) certificadas para gas, que presentan mejor resistencia frente al metano y al sulfuro de hidrógeno; del mismo modo, el PVC es

apropiado únicamente en tramos cortos y bajo techo, mientras que en recorridos largos o expuestos al sol resulta más conveniente el uso de tuberías PE/HDPE SDR11 certificadas para gas o, en su proximidad al generador, conducciones metálicas de cobre o galvanizado, las cuales ofrecen mayor seguridad y vida útil.

3.3.4.8. Techo protector del biodigestor

El biodigestor BB30 debe cubrirse con una estructura protectora que lo aisle de la radiación solar directa, lluvias y granizo, para ello, se construye un techo de calamina plástica de polipropileno, sostenido por columnas de madera tratada o estructura metálica liviana; esta cubierta no solo prolonga la vida útil de la geomembrana, sino que además contribuye a conservar una temperatura interna más estable, lo que favorece la actividad microbiológica; investigaciones recientes destacan que el aislamiento térmico mediante cubiertas reduce la pérdida de calor y mejora el rendimiento de digestores en climas variables (Josimović et al., 2024).

Para resguardar el biodigestor BB30 de la radiación solar, la lluvia y el granizo, se construye una cubierta de 17 m de largo por 2.40 m de ancho, con una pendiente de 10–15° y una altura libre de 0.50 a 0.80 m sobre la geomembrana; la cobertura se realiza con 18 hojas de calamina de polipropileno Flexiforte Rojo de 1.2 mm (1,10 × 3,05 m), colocadas en seis módulos longitudinales de tres hojas cada uno, aseguradas mediante 144 tornillos autoperforantes con arandela EPDM (ocho por hoja); la estructura portante se levanta con 12 columnas de madera de 10 × 10 cm (seis de 3.5 m de alto en el lado de barlovento y seis de 3.0 m en el lado de sotavento), unidas superiormente por dos vigas longitudinales de 5 × 15 cm y 17 m de largo. Sobre estas vigas se apoyan 6 correas de 5 × 10 cm y 2.40 m de largo espaciadas cada 0.70–0.90 m, y 5 tijerales de 5 × 10 cm y 3 m de largo para reforzar la rigidez transversal; el conjunto se estabiliza con 6 arriostres diagonales de 5 × 10 cm y 3 m, anclados mediante zapatas de hormigón y conectores metálicos en las uniones; finalmente, se incorporan 18 m de canaleta metálica con sus respectivos bajantes para evacuar aguas pluviales fuera de la zanja del biodigestor, asegurando así la protección y la durabilidad del sistema.

La zanja del biodigestor tendrá una profundidad total de 1.50 m (consistente con digestor BB30 y cama de arena), con planta 17.0 × 2.40 m; volumen de excavación estimado de 61 m³, la altura libre bajo cubierta se mantiene en 0.50–0.80 m para protección y control térmico.

3.3.4.9. Condiciones de operación del biodigestor

Temperatura

La fermentación en el biodigestor estará determinada por las condiciones climáticas de la zona de estudio, donde las temperaturas registradas oscilan entre 17,8 °C y 25,5 °C, con un promedio cercano a los 20 °C; este valor se encuentra dentro del rango inferior de la digestión mesofílica (20–45 °C), lo que significa que el proceso será llevado a cabo principalmente por bacterias mesófilas en condiciones de baja temperatura, y no estrictamente por bacterias psicrófilas, como suele asumirse para ambientes fríos; a efectos de diseño, se adopta una temperatura estándar de 20 °C, que representa un valor intermedio y estable dentro de las condiciones ambientales locales (Pérez, 2010).

La temperatura de operación es uno de los factores que más influye en el tiempo de retención hidráulico (TRH), ya que, a menor temperatura, la actividad metabólica de los microorganismos es más lenta y se requiere un mayor tiempo de permanencia de la biomasa dentro del digestor para lograr una adecuada degradación; de acuerdo con la literatura técnica, a 18 °C el TRH recomendado es de 28 días, mientras que a 24 °C puede reducirse a 20 días y a 30 °C hasta 14 días. En este contexto, considerando que la zona de Imaza presenta condiciones promedio de 20 °C, se ha establecido un TRH de referencia de 20 días, el cual equilibra la eficiencia de la digestión anaerobia con la realidad climática local; esta decisión garantiza una operación estable del biodigestor y asegura una producción de biogás coherente con las proyecciones de la investigación (Pérez, 2010).

Irradiación solar

En Imaza, el clima cálido y la buena disponibilidad de sol favorecen que el biodigestor mantenga condiciones térmicas estables para producir biogás; los mapas de irradiación global horizontal del Global Solar Atlas y Solargis muestran que, en la Amazonía peruana, los niveles diarios típicos se sitúan en torno a 4.5–5.0 kWh/m²/día, coherentes con mediciones y estimaciones locales reportadas para Bagua Grande (Amazonas), donde se registra un promedio anual cercano a 4.48 kWh/m²/día (Solargis, 2021; Torres, 2024); desde el punto de vista biológico, la operación mesofílica es la más estable para sistemas rurales y se ubica aproximadamente entre 30 y 40 °C, rango ampliamente documentado para digestores de estiércol y recomendado cuando no se dispone de calefacción activa (Lukehurst & Bywater, 2015).

Protección del biodigestor

Para asegurar la operatividad del biodigestor bajo las condiciones climáticas de Imaza (caracterizadas por episodios de lluvia y temperaturas cálidas) se implementará un cerco perimétrico metálico y una cubierta ligera (techo) sobre el área del reactor tubular; el cerco restringe el acceso de personas y animales, reduce riesgos de vandalismo o daños accidentales, y define un corredor de inspección; la cubierta, por su parte, disipa el impacto directo de la lluvia y atenúa la radiación UV sobre la biobolsa, alargando su vida útil y evitando diluciones indeseadas del sustrato por ingreso de agua.

El sistema contará con la cubierta protectora ya definida, la cual mitiga lluvia, granizo y radiación UV, estabilizando térmicamente la biobolsa y alargando su vida útil (véase 3.3.4.8 Techo protector del biodigestor); como complemento, se implementará un cerco perimétrico metálico (malla galvanizada, altura 1.80–2.00 m, portón con candado y franja libre ≥ 1 m para inspección), más señalización de “Gas inflamable” y drenaje pluvial perimetral, a fin de prevenir accesos no autorizados, daño por animales y encharcamientos.

Presión de operación del biodigestor

Para el biodigestor tipo BB30 se adopta un volumen nominal de $V = 30 \text{ m}^3$ y una longitud efectiva de implantación en zanja de $L = 17 \text{ m}$; la biobolsa se modela como cilindro de pared delgada, lo que permite una estimación coherente de sus dimensiones y de la presión interna admisible; el material es polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) con estabilizante UV, tal como emplea el BB30 comercial, y para verificación se adopta una tensión admisible de diseño conservadora $\sigma_{\text{adm}} = 10 \text{ MPa}$ (valor típico de ingeniería para LLDPE bajo servicio prolongado); el BB30 tiene un espesor típico que está entre 1.0 y 1.5 mm; la cubierta superior ya incluida en el proyecto se mantiene como protección frente a radiación, lluvia y sobrecalentamientos; suponiendo comportamiento cilíndrico, el volumen geométrico es:

$$V = \pi * r^2 * L$$

Donde:

V : Volumen geométrico

r : Radio

L : Longitud

$$30 = \pi * r^2 * 17$$

$$r = 0.75 \text{ m}$$

por lo que el diámetro hidráulico de cálculo resulta $D = 2r = 1.50 \text{ m}$, esta dimensión es coherente con la huella en zanja prevista para la Biobolsa BB30; para recipientes cilíndricos de pared delgada, las tensiones principales por efecto de la presión interna p son $\sigma_{\theta} = \frac{pr}{t}$ (tangencial) y $\sigma_L = \frac{pr}{2t}$ (longitudinal); impidiendo que σ_{θ} supere la tensión admisible del material, se obtiene la presión máxima admisible:

$$p_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_{adm} t}{r}$$

Donde:

$p_{m\acute{a}x}$: Presión máxima admisible

σ_{adm} : Tensión admisible del material (10 Mpa)

t : Espesor de la geomembrana (1mm -1.5 mm)

r : Radio (0.75 m)

$$p_{m\acute{a}x} = \frac{10 * 10^6 * 0.001}{0.75}$$

$$p_{m\acute{a}x} = 13.33 \text{ kPa}$$

Usando $r = 0.75 \text{ m}$ y $\sigma_{adm} = 10 \text{ MPa}$ los valores de $p_{m\acute{a}x}$ (en kPa, manométrica) resultan lineales con el espesor:

Tabla 13*Presiones internas máximas de operación de biodigestor*

Espesor t [mm]	$p_{m\acute{a}x}$ [kPa]
1.00	13.3
1.25	16.7
1.50	20.0

Nota. Cálculos para BB30 con $r = 0.75$ m y geomembrana LLDPE con $\sigma_{adm} = 10$ MPa (valor de diseño).

Aunque la verificación estructural define la presión máxima admisible $p_{m\acute{a}x}$, la operación real del BB30 se controla mediante la válvula de alivio descrito en la Sección 3.3.4.6, que fija un umbral de baja presión dado por la altura de agua; en términos prácticos, 10–20 cm de H₂O equivalen a 1.0 – 2.0 kPa y al descargarse automáticamente el biogás cuando p supera p_{op} , la operación queda muy por debajo de $p_{m\acute{a}x}$; así, aunque el cálculo fija $p_{m\acute{a}x}$, la válvula de alivio mantiene la presión de operación en el entorno de 1–2 kPa (10–20 cm H₂O), garantizando que el sistema trabaje muy por debajo del límite estructural.

3.3.4.10. Generador eléctrico

Con base en la potencia instalada de 2 260 W y un consumo energético diario de 5.72 kWh, el sistema BB30 requiere un generador monofásico de 3.0 kW, 220 V–60 Hz, con regulador automático de voltaje (AVR) y adaptado para operar con biogás de baja presión; este generador asegura un suministro confiable de energía, cubre la demanda pico y protege los equipos eléctricos de fluctuaciones; estudios recientes evidencian que la integración de generadores a biogás en instalaciones rurales es una estrategia eficaz para garantizar autonomía energética, siempre que se dispongan de sistemas de purificación de gas y regulación de presión (Josimović et al., 2024).

El diseño del biodigestor proyectado asegura una producción diaria de 16.9 m³ de biogás, con un contenido de metano de entre 8.5 y 10.1 m³ por día; considerando que cada metro cúbico de biogás puede generar en promedio 1.64 kWh de electricidad útil, se concluye que el sistema cuenta con una holgura suficiente, ya que la energía diaria requerida (5.72 kWh) puede

cubrirse con apenas 3.5 m³ de biogás; esto significa que existe un excedente considerable de combustible, lo cual otorga flexibilidad operativa y mayor seguridad de suministro

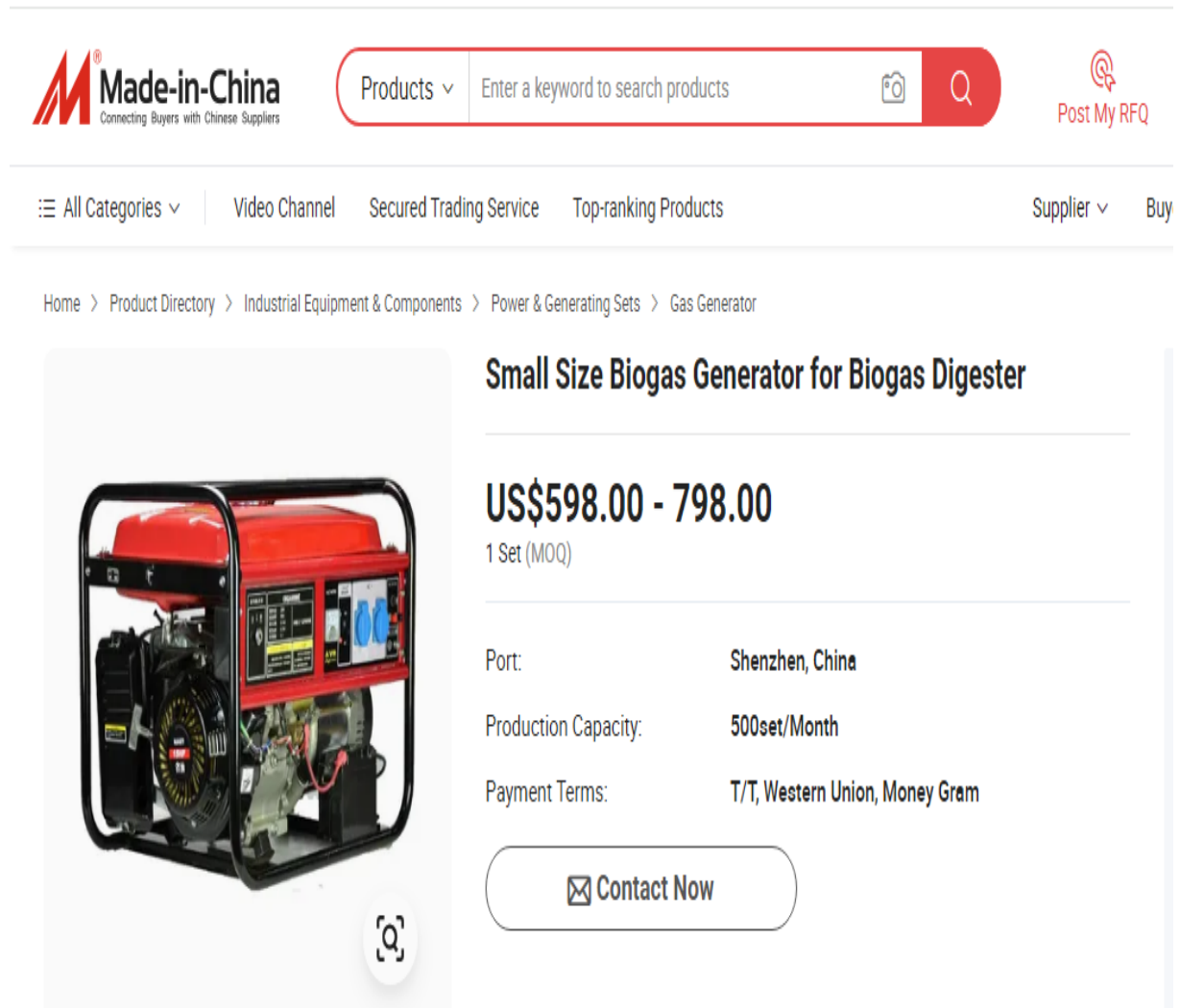
En base a estos resultados, se recomienda seleccionar un generador a biogás de 3.0 kW de potencia nominal, este valor es ligeramente superior a la potencia instalada calculada, lo que permite cubrir picos de arranque de equipos como la refrigeradora o la plancha sin que el generador trabaje al límite de su capacidad; además, un generador de 3 kW se ubica dentro del rango de operación más eficiente (60–80 % de su capacidad), garantizando un mejor rendimiento, menor desgaste mecánico y mayor vida útil del motor, en comparación, un generador de 2,5 kW sería suficiente en condiciones normales, pero podría resultar exigido en situaciones de uso simultáneo de varios equipos de alta demanda.

El modelo recomendado Small Size Biogas Generator para digestores (3 kW) es un generador monofásico, 220 V – 60 Hz, diseñado para operar con biogás en concentraciones de metano entre 50 y 65 %, se sugiere que cuente con arranque eléctrico y sistema de protección contra sobrecargas, baja presión de gas y sobretensión; asimismo, debe complementarse con accesorios indispensables para su durabilidad, tales como un filtro de ácido sulfhídrico (H₂S), una trampa de condensados y una válvula antirretorno de gas; estas medidas aseguran la estabilidad del suministro, reducen el riesgo de corrosión del motor y garantizan una combustión más limpia y eficiente.

Además del propio grupo electrógeno, el modelo Small Size Biogas Generator para digestores (3 kW) se comercializa con un kit básico de biogás, el cual incluye los componentes esenciales para garantizar la conexión y operación inicial del sistema; dicho kit está conformado por un regulador de presión, mangueras flexibles de conexión, válvula antirretorno de gas, trampa de condensados y los acoples correspondientes para unir el biodigestor con el motor generador; estos elementos permiten estabilizar el flujo del biogás, evitar retrocesos de llama hacia la línea de suministro y reducir la acumulación de humedad en la tubería, asegurando así condiciones mínimas de seguridad y continuidad operativa. Con 16.9 m³/d de biogás (27.7 kWh/d), para cubrir 5.72 kWh/d bastaría operar el generador de 3.0 kW unas 2 horas/día (o fraccionado en picos); alternativamente, integrar baterías permitiría suavizar picos nocturnos y reducir arranques.

Figura 9

Generador de biogás de pequeño tamaño para digestor



The image shows a screenshot of a product listing on the Made-in-China website. The header includes the Made-in-China logo, a search bar with the text "Enter a keyword to search products", and a "Post My RFQ" button. Below the header, there are navigation links for "All Categories", "Video Channel", "Secured Trading Service", "Top-ranking Products", "Supplier", and "Buy". The breadcrumb trail reads: "Home > Product Directory > Industrial Equipment & Components > Power & Generating Sets > Gas Generator". The product title is "Small Size Biogas Generator for Biogas Digester". The price is listed as "US\$598.00 - 798.00" for "1 Set (MOQ)". The port is "Shenzhen, China", the production capacity is "500set/Month", and the payment terms are "T/T, Western Union, Money Gram". A "Contact Now" button is visible below the product details. The product image shows a red and black generator unit.

Nota. La figura muestra el modelo comercial Small Size Biogas Generator ofertado por Shenzhen Teenwin Environment Co., Ltd., con un rango de potencia de 2–5 kW y precio referencial de USD 598 – 798, diseñado para operar con biogás proveniente de digestores domésticos o rurales (Made-in-China.com, 2025).

3.3.4.11. Curva de consumo del grupo electrógeno a biogás.

Con base en la ficha técnica del generador seleccionado (3,0 kW) y en los rangos de consumo específico reportados por el fabricante para 60–100 % de carga, se construyó la curva de consumo de biogás en función del porcentaje de carga; la curva se empleará para estimar el requerimiento horario de combustible en los distintos regímenes de operación del sistema (base, pico y arranque), y para validar el balance energético diario del proyecto.

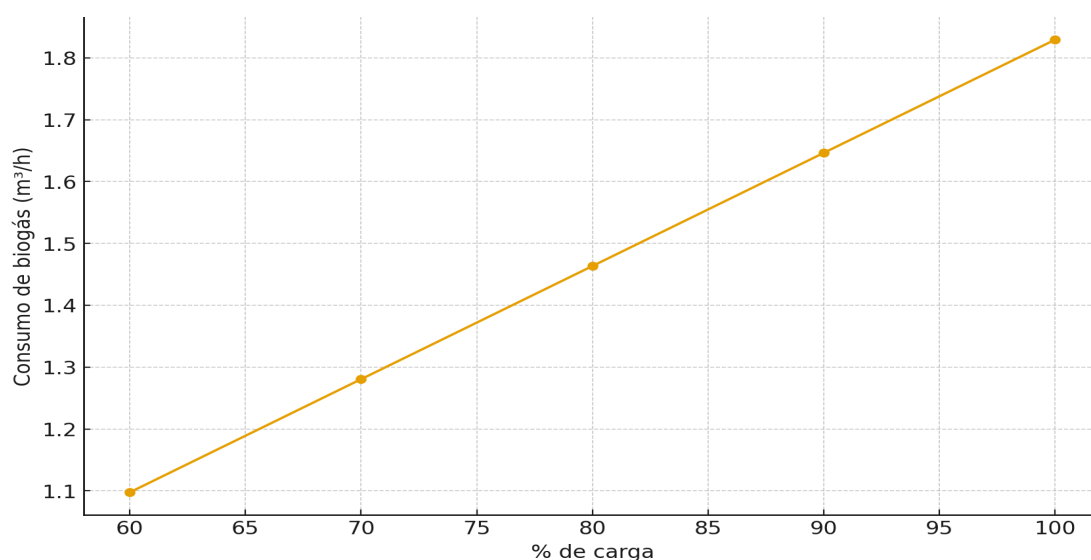
Tabla 14*Especificaciones técnicas del generador a biogás seleccionado*

Característica	Especificación técnica
Modelo propuesto	Small Size Biogas Generator para digestores
Potencia nominal	3.0 kW (3 000 W)
Potencia máxima	3.3 – 3.5 kW
Voltaje de salida	220 V monofásico (opcional 110 V)
Frecuencia	50 / 60 Hz
Tipo de motor	Motor de combustión interna, 4 tiempos, refrigerado por aire
Combustible	Biogás (50–65 % CH ₄)
Consumo específico de biogás	1.3 – 1.9 m ³ /h a 60–100 % de carga
Sistema de arranque	Eléctrico (12 V DC) y manual de respaldo
Regulación de voltaje	AVR (Automatic Voltage Regulator)
Salida adicional	DC 12 V / 8.3 A (para carga de baterías o accesorios)
Sistema de protección	Bajo nivel de aceite, sobrecarga, sobretemperatura, baja presión de gas
Nivel de ruido	≤ 72 dB(A) @ 7 m
Dimensiones aproximadas	710 × 520 × 580 mm
Peso aproximado	78 – 85 kg
Accesorios recomendados	Filtro de H ₂ S, trampa de condensados, válvula antirretorno y regulador de presión de gas
Vida útil estimada	> 5 000 horas de operación con mantenimiento preventivo adecuado

Nota. Datos referenciales obtenidos de fichas técnicas comerciales del fabricante Shenzhen Teenwin Environment Co., Ltd.

Tabla 15*Curva de consumo de biogás del grupo electrógeno*

% de carga	Potencia (kW)	Consumo de biogás (m ³ /h)	Consumo específico (m ³ /kWh)
60.0	1.8	1.098	0.61
70.0	2.1	1.280	0.61
80.0	2.4	1.463	0.61
90.0	2.7	1.646	0.61
100.0	3.0	1.829	0.61

Nota. Elaboración propia**Figura 10***Curva %carga – consumo de biogás del generador (3 kW)**Nota.* Elaboración propia**3.3.4.12. Estrategia de operación y programación horaria.**

Dado que la demanda diaria del Fundo Nuevo Mundo es de 5.72 kWh y la producción de biogás estimada (16.9 m³/d) otorga holgura energética, la estrategia de operación prioriza trabajar el grupo electrógeno en el rango de mayor rendimiento (60–80 % de su capacidad), minimizando arranques y manteniendo reservas de biogás; bajo estas premisas y según el perfil de uso (iluminación vespertina/nocturna, ciclos de refrigeración y cargas puntuales), se propone una operación distribuida en **ventanas cortas concentradas en picos de demanda**, totalizando

2 h/día (o su equivalente fraccionado), suficiente para asegurar la energía diaria y suavizar picos de potencia; esta estrategia reduce desgaste del motor, estabiliza el consumo de combustible y facilita el mantenimiento preventivo.

Tabla 16

Programa referencial de operación del grupo electrógeno

Franja horaria	Objetivo operativo	Carga objetivo (kW)	%carga	Horas	Consumo esperado (m ³ /h)	Energía (kWh)	Biogás (m ³)
06:30–07:15	Base matutina	2.1	70	0.75	1.28	1.575	0.96
18:30–20:00	Pico vespertino	2.4	80	1.50	1.463	3.6	2.194
21:00–21:15	Ajuste nocturno	2.1	70	0.25	1.28	0.525	0.32

Nota. Tres franjas horarias que suman 2.5 h/día; energía 5.7 kWh y biogás 3.47 m³, coherente con el cálculo teórico de 3.49 m³.

3.3.4.13. Cálculo de los alimentadores

Cálculo del alimentador general

Datos de diseño:

Potencia del generador $P = 3.0$ kW, Tensión $V = 220$ V, Factor de potencia $FP = 0.9$, Longitud unidireccional del alimentador $L = 10$ m, Potencia instalada 2,260 W, Energía diaria 5.72 kWh

a) Corriente del alimentador (monofásico)

$$I = \frac{P}{V * FP}$$

Donde:

P : Potencia del generador

V : Tensión

FP : Factor de potencia

$$I = \frac{3000}{200 * 0.9}$$

$$I = 15.15 A$$

b) Selección térmica (ampacidad) y protección

Para cargas continuas se diseña al 125 %:

$$I_{diseño} = 1.25 I$$

$$I_{diseño} = 1.25 * 15.15$$

$$I_{diseño} = 18.94 A$$

Para la $I_{diseño}$ igual a 18.94 A se selecciona un conductor de cobre normalizado de 6 mm² (aislación típica THHN/XLPE en canalización: L, N y PE del mismo calibre) cuya ampacidad comercial está en el orden de 36–41 amperios. En cuanto a la protección se selecciona un Interruptor termomagnético 20 A (curva C: recomendada para usos generales de vivienda, incluye motores chicos como refrigeradora/bomba), pues cumple la siguiente regla básica:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

Donde:

I_b : Corriente de carga

I_n : Corriente nominal del interruptor termomagnético

I_z : Ampacidad del conductor instalado (considerando correcciones por temperatura/agrupamiento).

Con 2.5 mm² Cu, $I_z = 21 - 24A$

$$15.15 \leq 20 \leq 36$$

c) Verificación de caída de tensión

Para circuito monofásico, ida y vuelta (dos conductores), con cobre, el porcentaje de caída de tensión viene dado por la siguiente expresión:

$$\% \Delta V = \frac{2LI\rho}{SV} \times 100$$

Donde:

$\% \Delta V$: Porcentaje caída de tensión

L : Longitud unidireccional (10 m)

I : Corriente (A)

ρ : Resistividad del material (cobre = 0.0175 Ω mm²/m)

S : Sección del conductor (2.5 mm²)

V : Tensión (V)

$$\% \Delta V = \frac{2(10)(15.15)(0.0175)}{(2.5)(220)} \times 100$$

$$\% \Delta V = 0.96\%$$

La caída de tensión calculada es 0.96% inferior al 2.5% recomendado para alimentadores según el Código Nacional de Electricidad-Utilización, por lo que la sección de alimentador seleccionada es la adecuada.

Cálculo del alimentador a la vivienda

Datos de diseño:

Potencia $P = 2.26$ kW, Tensión $V = 220$ V – 60 Hz, Factor de potencia $FP = 0.9$ (cargas mixtas con motor de refrigeradora), Longitud unidireccional del alimentador $L = 20$ m, caída de tensión objetivo menor al 4%.

a) Corriente del alimentador (monofásico)

$$I = \frac{P}{V * FP}$$

Donde:

P : Potencia del generador

V : Tensión

FP : Factor de potencia

$$I = \frac{2260}{200 * 0.9}$$

$$I = 11.41 A$$

b) Selección térmica (ampacidad) y protección

Para cargas continuas se diseña al 125 %:

$$I_{diseño} = 1.25 I$$

$$I_{diseño} = 1.25 * 11.41$$

$$I_{diseño} = 14.3 A$$

Para la $I_{diseño}$ igual a 14.3 A se selecciona un conductor de cobre de 2x2.5 mm² (aislación típica THHN/XLPE en canalización), cuya ampacidad comercial está en el orden de 20–24 amperios. En cuanto a la protección se selecciona un Interruptor termomagnético 16 A (curva C: recomendada para usos generales de vivienda, incluye motores chicos como refrigeradora/bomba), pues cumple la siguiente regla básica:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

Donde:

I_b : Corriente de carga

I_n : Corriente nominal del interruptor termomagnético

I_z : Ampacidad del conductor instalado (considerando correcciones por temperatura/agrupamiento).

Con 2.5 mm² Cu, $I_z = 21 -24A$

$$11.41 \leq 16 \leq 21$$

c) Verificación de caída de tensión

Para circuito monofásico, ida y vuelta (dos conductores), con cobre, el porcentaje de caída de tensión viene dado por la siguiente expresión:

$$\% \Delta V = \frac{2LI\rho}{SV} \times 100$$

Donde:

$\% \Delta V$: Porcentaje caída de tensión

L : Longitud unidireccional (20 m)

I : Corriente (A)

ρ : Resistividad del material (cobre = $0.0175 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)

S : Sección del conductor (2.5 mm^2)

V : Tensión (V)

$$\% \Delta V = \frac{2(20)(11.41)(0.0175)}{(2.5)(220)} \times 100$$

$$\% \Delta V = 1.45\%$$

La caída de tensión calculada es 1.45% inferior al 4% recomendado para alimentadores según el Código Nacional de Electricidad-Utilización, por lo que la sección de alimentador seleccionada es la adecuada.

3.4. Evaluar la viabilidad económica de la generación eléctrica con biogás del sistema diseñado, construyendo el flujo de caja a 10 años a partir del CAPEX del sistema (presupuesto detallado), los ingresos por ahorro frente a la alternativa convencional y los OPEX anuales (operación y mantenimiento), y calculando los indicadores VAN y TIR.

3.4.1. Costos de instalación inicial de la propuesta

Tabla 17

Presupuesto detallado del sistema de biodigestión

Ítem	Descripción	Unidad	Cant.	P. Unit. (S/)	Parcial (S/)
1.0 Suministro del biodigestor y línea de biogás					
1.1	Biobolsa tubular ~30 m ³ (HDPE 0.8–1.0 mm) con bocas y sellos	Und.	1	6,500	6,500
1.2	Tubería PVC SAP 1" (PN10) para gas/afluentes	m	50	8	400
1.3	Tubería PVC SAP 2" (PN10) para lodos/efluentes	m	30	18	540
1.4	Válvula de bola PVC 1"	Und.	6	25	150
1.5	Válvula de bola PVC 2"	Und.	2	60	120
1.6	Codo 90° PVC 1"	Und.	10	4	40
1.7	Codo 90° PVC 2"	Und.	6	10	60
1.8	Tee PVC 1"	Und.	6	6	36
1.9	Tee PVC 2"	Und.	4	18	72
1.1	Pegamento PVC 1/4 L + limpiador	Und.	2	30	60
1.11	Manguera reforzada para biogás 1" (a motor)	m	30	15	450
1.12	Regulador de presión biogás 0–2 kPa	Und.	1	550	550
1.13	Válvula antirretorno biogás 1"	Und.	2	120	240
1.14	Manómetro 0–5 kPa	Und.	1	80	80
1.15	Trampa de condensados	Und.	1	180	180
1.16	Filtro de H ₂ S (canister con medio)	Und.	1	650	650
1.17	Arrestador de retroceso (antillamas) 1"	Und.	1	350	350
1.18	Abrazaderas, bridas y teflón	Glb.	1	120	120
SUB-TOTAL 1.0					10,598.00
2.0 Obras civiles y protección					

2.1	Excavación de zanja p/biobolsa (según planos) ~26 m ³	m ³	26	30	780
2.2	Cama de arena 10 cm	m ³	2.2	60	132
2.3	Geotextil de protección (fondo y laterales)	m ²	25	8	200
2.4	Relleno y compactación	m ³	20	25	500
2.5	Techo polipropileno 1.2 mm 1.10×3.05 m	Und.	6	95	570
2.6	Estructura de madera (postes 4×4", listones) + tornillería	Glb.	1	385	385
SUB-TOTAL 2.0					2,567.00
3.0 Sistema eléctrico de generación y distribución					
3.1	Generador a biogás 3 kW, 220 V, 60 Hz, con kit biogás	Und.	1	4,500	4,500
3.2	Conmutador manual (I-0-II) 2P 32 A	Und.	1	350	350
3.3	Tablero general IP54 con barras PE/N	Und.	1	250	250
3.4	MCB 2P 20 A curva C (principal)	Und.	1	60	60
3.5	Interruptor diferencial 2P 25 A, 30 mA (RCD)	Und.	1	180	180
3.6	SPD Tipo 2, 230 V	Und.	1	250	250
3.7	MCB 1P 10 A (iluminación)	Und.	1	25	25
3.8	MCB 1P 16 A (tomacorrientes)	Und.	2	25	50
3.9	Conductores Cu THHN/THWN-2 6 mm ² (F,N,PE) – alimentador 10 m	m	30	8	240
3.1	Conductores Cu THHN/THWN-2 2.5 mm ² – vivienda y circuitos	m	180	4.5	810
3.11	Conductores Cu THHN/THWN-2 1.5 mm ² – iluminación	m	120	3.5	420
3.12	Canalización PVC conduit 1"	m	30	5.5	165
3.13	Canalización PVC conduit 3/4"	m	80	3.5	280
3.14	Cajas, accesorios de canalización	Glb.	1	150	150
3.15	Tomacorrientes 2P+T 16 A	Und.	10	18	180
3.16	Interruptores de pared	Und.	6	15	90
3.17	Placas y marcos	Und.	16	5	80
3.18	Luminarias LED 10 W	Und.	8	18	144
3.19	Puesta a tierra: varilla cobre 5/8"×2.4 m	Und.	1	120	120
3.2	Conductor de tierra Cu 6 mm ²	m	25	8	200
3.21	Caja de inspección para PAT	Und.	1	80	80
3.22	Aditivo/electrolito para PAT	Und.	1	50	50
3.23	Conectores y abrazaderas para PAT	Glb.	1	40	40

SUB-TOTAL 3.0					8,714.00
4.0 Montaje y puesta en marcha					
4.1	Montaje del biodigestor y línea de biogás (mano de obra y EPP)	Glb.	1	900	900
4.2	Montaje del sistema eléctrico (tendido, conexionado, pruebas)	Glb.	1	900	900
4.3	Puesta en marcha y capacitación básica (1 día)	Glb.	1	400	400
SUB-TOTAL 4.0					2,200
COSTO DIRECTO (1.0+2.0+3.0+4.0)					24,079
GASTOS GENERALES (10%)					2,407.9
SUB TOTAL					26,486.9
IGV (18%)					4,767.64
TOTAL PRESUPUESTADO					31,254.54

Nota. Partidas: 1) biodigestor y gas; 2) obras civiles; 3) sistema eléctrico; 4) montaje; los montos son en soles.

El presupuesto corresponde al diseño e implementación de un sistema integral de biodigestión (BB30) con generación eléctrica a biogás para el Fundo Nuevo Mundo; se estructura en cuatro partidas: (1) suministro del biodigestor y línea de gas, (2) obras civiles y protección, (3) sistema eléctrico de generación y distribución y (4) montaje y puesta en marcha. El Costo Directo asciende a S/ 24,079, distribuido así: Partida 1 (44.01 %), Partida 2 (10.66 %), Partida 3 (36.19 %) y Partida 4 (9.14 %); con Gastos Generales 10 % y IGV 18 %, el Total Presupuestado es S/ 31,254.54.

La Partida 1 incluye la biobolsa tubular ~30 m³ (HDPE 0.8–1.0 mm) y toda la red de biogás en baja presión, conformada por tuberías PVC SAP PN10 de 1" y 2", válvulas de bola, codos y tees, pegamentos/limpiadores y la manguera reforzada hacia el motor; se incorporan elementos de seguridad y calidad del gas: regulador de presión (0–2 kPa), válvulas antirretorno, manómetro, trampa de condensados, filtro de H₂S (protege el motor frente a corrosión) y arrestador de retroceso (antillamas); esta partida concentra el mayor peso económico junto con el generador, pues reúne los equipos principales y los accesorios críticos para operación segura y estable.

La Partida 2 cubre las obras civiles: excavación de la zanja (26 m³), cama de arena (10 cm) y geotextil para proteger la biobolsa de punzonamientos, así como relleno y compactación; se añade un techo de polipropileno y estructura de madera (postes/listones) para protección UV y pluvial, favoreciendo temperatura más estable del digestor y mayor vida útil del HDPE.

La Partida 3 contempla la planta eléctrica a biogás de 3 kW, 220 V, 60 Hz (con kit biogás), el conmutador manual (I-0-II) para seleccionar red/grupo, y un tablero IP54 con protecciones normativas: MCB principal 2P 20 A curva C, RCD 25 A, 30 mA, SPD tipo 2, y circuitos derivados (10 A iluminación y 16 A tomacorrientes); los conductores Cu THHN/THWN-2 se dimensionan con 6 mm² para el alimentador (10 m) y 2,5 mm²/1,5 mm² para tomas e iluminación, buscando margen térmico y baja caída de tensión (y dejando capacidad de expansión); se incluyen canalizaciones en conduit PVC, luminarias LED y el sistema de puesta a tierra (varilla 5/8"×2,4 m, conductor de tierra y accesorios).

La Partida 4 integra los servicios de montaje, pruebas funcionales y puesta en marcha con capacitaciones básicas al personal del fundo (operación segura, purgas de condensados, recambio del medio del filtro de H₂S y rutina de inspección); en conjunto, el paquete propuesto asegura calidad del gas, seguridad operativa y cumplimiento eléctrico básico, garantizando una instalación robusta y escalable para el aprovechamiento energético del biogás.

3.4.2. Ingresos

3.4.2.1. Ingresos por bonos de carbono

Con base en la producción de biogás estimada (16.9 m³/d) y un contenido de metano entre 50–60 %, el sistema generaría 8.45–10.14 m³ CH₄/d, utilizaremos un valor medio de 9.30 CH₄/d, convertido a masa ($\rho = 0,716 \text{ kg/m}^3$) y anualizado, empleando $\text{GWP}_{\text{CH}_4}=28$, el potencial de reducción asciende a 68.05 tCO_{2e}/año; considerando eficiencia de captura de 60–90 % (tomaremos 80%) y destrucción del 98 %, las reducciones efectivas se sitúan en 53.35 tCO_{2e}/año; con un precio referencial de 22 USD/tCO_{2e} (conforme a referencias de mercado voluntario 2024–2025), el ingreso potencial por créditos de carbono se ubica entre 640.20 USD/año; el cálculo justificatorio se presenta a continuación:

Volumen anual de CH₄

$$V_{\text{CH}_4,\text{anual}} = V_{\text{CH}_4,\text{día}} \times 365$$

Donde:

$V_{CH_4,anual}$: Volumen anual generado de CH₄

$V_{CH_4,día}$: Volumen diario generado de CH₄ (8.45–10.14 m³ CH₄/d; utilizaremos un valor medio de 9.30 CH₄/d)

$$V_{CH_4,anual} = 9.30 \times 365$$

$$V_{CH_4,anual} = 3394.50 \text{ CH}_4/\text{año}$$

Masa anual de CH₄

$$m_{CH_4,anual} = V_{CH_4,anual} \times \rho_{CH_4}$$

Donde:

$m_{CH_4,anual}$: Masa anual de CH₄ (Kg/año)

$V_{CH_4,anual}$: Volumen anual generado de CH₄

ρ_{CH_4} : Densidad del metano a condiciones estándar (0.716 kg/m³)

$$m_{CH_4,anual} = 3,394.50 \times 0.716$$

$$m_{CH_4,anual} = 2,430.46 \text{ Kg/año}$$

Toneladas de CO₂e

$$tCO_2e/\text{año} = \frac{m_{CH_4,anual}}{1000} \times GWP_{CH_4}$$

Donde:

$tCO_2e/\text{año}$: Toneladas de CO₂e por año

GWP_{CH_4} : Potencial de calentamiento global del metano (IPCC AR5, 100 años) =28

$m_{CH_4,anual}$: Masa anual de CH₄ (Kg/año)

$$tCO_2e/año = \frac{2,430.46}{1000} \times 28$$

$$tCO_2e/año = 68.05$$

Ajuste por captura y destrucción

$$tCO_2e/año (efectivas) = \frac{tCO_2e}{año} \times f_{captura} \times f_{destrucción}$$

Donde:

$tCO_2e/año$: Toneladas de CO₂e por año

$f_{captura}$: factor de captura de 60–90 %, consideraremos 90%

$f_{destrucción}$: factor de destrucción del 98 %

$$tCO_2e/año (efectivas) = 68.05 \times 0.90 \times 0.98$$

$$tCO_2e/año (efectivas) = 68.05 \times 0.90 \times 0.98$$

$$tCO_2e/año (efectivas) = 60.02$$

Valor económico referencial

$$Ingreso = tCO_2e/año (efectivas) \times P_{crédito}$$

$$Ingreso = 60.02 \times \$22$$

$$Ingreso = 1,320.44 \text{ USD/año}$$

$$Ingreso = 1,320.44 \times 3.60 \text{ soles/año}$$

$$Ingreso = 4,753.58 \text{ soles/año}$$

3.4.2.2. Ingresos por ahorro de energía

El proyecto genera un beneficio económico por costos evitados de compra de electricidad, asumiendo una demanda de 5.72 kWh/día y que la energía autogenerada cubre el 100 % de dicha demanda, el ahorro anual se estimó como:

$$Ahorro_{anual} = (E_{dem} * 365 * \alpha) * T$$

Donde:

E_{dem} : demanda eléctrica del fundo (kWh/día).

α : factor de operación (0–1), se tomó 1 para operación todo el año

T : Tarifa total aplicable (S/ por kWh, incluyendo IGV y cargos variables, para No Residencial BT5 equivalente a 0.82/kWh con IGV).

$$Ahorro_{anual} = (5.72 * 365 * 1) * 0.82$$

$$Ahorro_{anual} = 1,711.99 \text{ soles/año}$$

3.4.3. Egresos

Tabla 18

Egresos considerados en el flujo

Ítem	Tipo de egreso	Periodicidad	Base de cálculo	Monto (S/)	Año de aplicación	Descripción
1	CAPEX inicial	Único	Total presupuestado (con IGV)	31,254.54	0	Partidas 1–4
2	OPEX de operación y mantenimiento	Anual	2 % del CAPEX	625.09 / año	1–10	Mantenimiento preventivo biodigestor y línea de gas
3	Overhaul del generador	Puntual	30 % del costo del generador (S/ 4,500)	1,350	5	Mantenimiento mayor para extender vida útil.

Nota. El CAPEX corresponde al presupuesto detallado (incluye GG e IGV); el OPEX 3 % es un supuesto conservador anual; el overhaul del generador se considera en el año 5 para sostener rendimiento y vida útil.

En conjunto, estos tres egresos representan una trayectoria de costos coherente con el ciclo de vida del activo: (i) un desembolso inicial que habilita la operación, (ii) gastos anuales para sostenerla con seguridad y (iii) una reposición crítica que preserva el rendimiento del generador.

3.4.4. VAN y TIR

Para el cálculo del VAN y la TIR se adopta una tasa de descuento del 10 %, adecuada para un proyecto privado de pequeña escala en el ámbito rural; se emplea un COK del 10% que recoge el costo de oportunidad del capital del dueño del fundo y el riesgo del proyecto (escala pequeña, operación rural, variabilidad del precio del carbono y del costo de mantenimiento); esta tasa se alinea con un rango razonable de 8–11% real obtenido al sumar una referencia de riesgo libre real en soles (3–4%) y una prima de riesgo del proyecto (5–7%); bajo este COK, el proyecto alcanza $VAN = S/ 3,273.95$ y $TIR = 12.43\%$, por lo que resulta económicamente viable.

Tabla 19*Cálculo de VAN y TIR*

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos											
Bonos de carbono	0	4,753.58	4,753.58	4,753.58	4,753.58	4,753.58	4,753.58	4,753.58	4,753.58	4,753.58	4,753.58
Ahorro energía	0	1,711.99	1,711.99	1,711.99	1,711.99	1,711.99	1,711.99	1,711.99	1,711.99	1,711.99	1,711.99
	0	6,465.57	6,465.57	6,465.57	6,465.57	6,465.57	6,465.57	6,465.57	6,465.57	6,465.57	6,465.57
Egresos											
CAPEX inicial	31,254.54										
OPEX de operación y mantenimiento		625.09	625.09	625.09	625.09	625.09	625.09	625.09	625.09	625.09	625.09
Overhaul del generador						1350.00					1,350.00
	31,254.54	625.09	625.09	625.09	625.09	1,975.09	625.09	625.09	625.09	625.09	1,975.09
Utilidad	-31,254.54	5,840.48	5,840.48	5,840.48	5,840.48	4,490.48	5,840.48	5,840.48	5,840.48	5,840.48	4,490.48

COK	10%
-----	-----

VAN	S/ 3,273.95
TIR	12.43%

Se adopta un horizonte de 10 años porque coincide con el ciclo de vida económico de los principales componentes: la biobolsa HDPE suele durar 8–12 años, las obras civiles entre 10–15 años, y el generador de 3 kW requiere un overhaul hacia el año 5 para sostener su rendimiento; además, este plazo es consistente con prácticas de evaluación de proyectos energéticos rurales y con periodos de acreditación de reducciones comunes (7–10 años); por ello, 10 años equilibran completitud y prudencia.

El VAN positivo indica que, descontando los flujos del proyecto al 10%, la inversión recupera su costo de oportunidad y además genera un excedente de S/ 3,273.95 en términos presentes; en otras palabras, el proyecto crea valor para el dueño del fundo bajo los supuestos utilizados (ingresos por ahorro de energía y créditos de carbono; OPEX anual y overhaul programado).

La TIR es la tasa a la cual el VAN se hace cero; como $12.43\% > 10\%$, el rendimiento interno del proyecto supera el costo de oportunidad del capital, esto significa que cada sol invertido rinde por encima de la tasa exigida, por lo que el proyecto es financieramente viable; en ese sentido el $\text{VAN} > 0$ y $\text{TIR} > \text{COK}$ confirman la viabilidad económica.

IV. DISCUSIÓN

La evaluación del requerimiento energético del Fundo Nuevo Mundo permitió determinar que la potencia instalada asciende a 2,260 W (2.26 kW) y el consumo energético diario es de 5,72 kWh/día, valores que constituyen la base técnica para el dimensionamiento del sistema de generación a partir de biogás; estos resultados se alinean con lo reportado por Barrios (2023), quien en su estudio en el sector Santa Julia, Motupe, identificó un consumo promedio de 2,614 Wh/día por vivienda, alcanzando un total proyectado de 54,389.8 Wh/día en 20 años, lo que evidencia que, aunque la escala poblacional difiere, en ambos casos la caracterización de la demanda eléctrica fue el punto de partida para definir la capacidad del biodigestor y del grupo electrógeno; asimismo, se observa coincidencia con Vásquez (2020), quien en el Fundo San José – Cajamarca estimó una demanda de 9.294 kWh/día para una potencia instalada de 3.52 kW, confirmando que en los sistemas rurales las cargas domésticas y productivas representan los principales condicionantes para la infraestructura de biogás; finalmente, estudios como el de Castañeda y Herrera (2019) y Delgado (2018) demuestran que, aun en escenarios de mayor escala, la estimación detallada de los requerimientos energéticos fue indispensable para garantizar que la generación a partir de biogás no solo cubriera la demanda eléctrica, sino que además resultara rentable y sostenible en el tiempo.

La cuantificación del estiércol bovino en el Fundo Nuevo Mundo permitió establecer una disponibilidad diaria de 2,340 kg/día, donde la mayor proporción proviene de las vacas debido a su predominio poblacional, lo que garantiza un suministro constante de biomasa para la generación de biogás; este resultado se relaciona con lo señalado por Barrios (2023), quien reportó una producción de 594.8 kg/día en el sector Santa Julia, Motupe, dimensionando así un biodigestor de geomembrana de PVC que aseguraba la continuidad del sistema energético; ambas investigaciones confirman que la biomasa generada por el ganado es suficiente para respaldar la viabilidad técnica de los proyectos de biogás; del mismo modo, Castañeda y Herrera (2019) obtuvieron un volumen de 2,700 kg/día de estiércol en la Hacienda El Potrero Bellavista – Jaén, cifra comparable con la del Fundo Nuevo Mundo, lo que evidencia que, incluso en diferentes contextos geográficos y productivos, el recurso pecuario constituye la base para un dimensionamiento acertado del biodigestor; asimismo, investigaciones experimentales como la de Valdez y Lozano (2023), quienes produjeron biogás a partir de mezclas de estiércol vacuno y de cuy, confirman que la cantidad y calidad del sustrato son determinantes para obtener rendimientos estables de metano, reforzando la importancia de disponer de un volumen de biomasa suficiente como el calculado en el Fundo Nuevo Mundo.

Los resultados obtenidos en el dimensionamiento del biodigestor del Fundo Nuevo Mundo evidencian que, a partir de 409.5 kg/día de estiércol aprovechable, es posible alcanzar una producción diaria de 16.9 m³ de biogás, lo cual coincide con los valores reportados por Varol y Uğurlu (2017), quienes señalan rendimientos de 0.4–0.6 m³ de biogás/kg de sólidos volátiles destruidos en digestión mesofílica; estos hallazgos guardan relación con lo expuesto por Barrios (2023), que diseñó un biodigestor de geomembrana en Motupe con un rendimiento de 5.4 m³/día, suficiente para cubrir la demanda de su comunidad, aunque en menor escala respecto al presente estudio, lo que evidencia la influencia del número de animales y la biomasa disponible; asimismo, Castañeda y Herrera (2019) estimaron 123.52 m³/día de biogás en la Hacienda El Potrero Bellavista, dimensionando un biodigestor tubular de 460 m³; aunque a mayor escala, confirma que el correcto cálculo de TRH y mezcla hídrica es esencial para garantizar eficiencia y continuidad en la producción; por otro lado, Vásquez (2020) obtuvo una producción de 7.3 m³/día en el Fundo San José, Cajamarca, dimensionando un biodigestor tubular de 10.91 m³, con resultados comparables en la relación estiércol disponible–volumen de biogás; finalmente, la selección del modelo BB30 tipo Taiwán resulta coherente con la priorización de bajo costo y facilidad de construcción reportada en estudios internacionales (Obileke et al., 2024), siendo una alternativa adecuada al contexto amazónico, al equilibrar viabilidad técnica, económica y operativa.

Los resultados económicos obtenidos en el Fundo Nuevo Mundo, con un VAN de S/ 3,273.95 y una TIR de 12.43 %, son consistentes con lo señalado por Barrios (2023), quien reportó un VAN de S/ 3 421,78 y una TIR del 3.3 % mensual en un proyecto similar en Motupe, demostrando que, pese a diferencias en escala y contexto, los sistemas de biogás presentan retornos financieros atractivos en zonas rurales; de igual forma, Castañeda y Herrera (2019) lograron un VAN positivo de S/ 4,344.23 y una TIR del 13 % en Jaén, confirmando la tendencia de que la valorización de estiércol bovino como recurso energético se traduce en beneficios económicos sostenibles; a nivel internacional, Velásquez (2020) demostró que el aprovechamiento de residuos porcinos en Colombia redujo significativamente los costos operativos de la granja, en tanto que Guevara (2025) alcanzó un VAN de más de S/ 2 millones y una TIR de 84 % en Cutervo, resaltando que la escala de operación influye directamente en la magnitud de los beneficios financieros; en contraste, Albitres (2020) advirtió que sin apoyo externo los costos operativos pueden comprometer la viabilidad de proyectos de biogás en centros poblados, lo que evidencia que la rentabilidad depende no solo de los ingresos por energía y bonos de carbono, sino también de una adecuada gestión financiera y del acceso a

fuentes de financiamiento; en este sentido, los hallazgos del Fundo Nuevo Mundo confirman que, con una inversión inicial de S/ 31,254.54 y un esquema de ingresos diversificado, el sistema de biogás es económicamente rentable y sostenible, constituyendo un modelo replicable en unidades productivas rurales de características similares.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Con base en el análisis de evaluar el requerimiento energético del Fundo Nuevo Mundo, se concluye que el levantamiento de información realizado en el Fundo Nuevo Mundo permitió determinar con precisión la potencia instalada y el consumo energético diario, evidenciándose un total de 2,260 W (2.26 kW) de potencia instalada y un consumo de 5.72 kWh/día; estos valores constituyen la base técnica para el dimensionamiento del sistema de generación a biogás, ya que reflejan la diversidad de cargas presentes.
2. La cuantificación del estiércol generado por el ganado vacuno en el Fundo Nuevo Mundo permitió establecer que la producción diaria alcanza los 2,340 kg/día, de los cuales la mayor proporción corresponde a las vacas por su predominio poblacional frente a los toros; este resultado, obtenido mediante el criterio técnico del 6 % del peso vivo como promedio de excreción, confirma la existencia de un volumen considerable y constante de biomasa disponible, lo que asegura el abastecimiento de materia prima para la generación de biogás.
3. El diseño del sistema integrado de biodigestor y generador eléctrico para el Fundo Nuevo Mundo permitió dimensionar un biodigestor tubular tipo Biobolsa BB30 (30 m³), con un tiempo de retención hidráulico de 20 días y una carga diaria de 1,219 m³ de mezcla (409,5 kg de estiércol más 819 L de agua); este dimensionamiento garantiza estabilidad operacional y adecuada degradación de la materia orgánica, alcanzando una producción de 16.9 m³ de biogás por día, con un contenido de metano de 50–60 %, lo que equivale a entre 8.5 y 10.1 m³ de CH₄/día; al convertirlo en energía eléctrica, el sistema puede generar 25–30 kWh/día, es decir, hasta cinco veces la demanda estimada de 5.72 kWh/día, lo que asegura no solo cubrir el consumo actual sino disponer de un margen para ampliaciones futuras.
4. El análisis económico de la propuesta evidenció que el sistema de biodigestión BB30 con generación eléctrica a biogás para el Fundo Nuevo Mundo es financieramente viable, alcanzando un VAN positivo de S/ 3,273.95 y una TIR de 12.43 %, superiores al costo de oportunidad del capital estimado en 10 %; el horizonte de evaluación de 10 años se ajusta a la vida útil de la biobolsa (8–12 años), obras civiles (10–15 años) y generador (con overhaul al año 5), garantizando así sostenibilidad en el tiempo; asimismo, el análisis incluyó ingresos por ahorro en consumo eléctrico y por créditos de carbono, estimados en 68.05 tCO₂e/año, lo que refuerza el valor agregado ambiental del proyecto.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que, a partir del diagnóstico energético realizado, se establezca un plan de monitoreo y actualización periódica del consumo eléctrico en el Fundo Nuevo Mundo, de modo que el diseño del sistema de generación a biogás se mantenga ajustado a la variabilidad en la demanda, especialmente ante posibles incrementos por la incorporación de nuevos equipos domésticos o productivos.
2. Se recomienda implementar un sistema de registro y monitoreo continuo de la producción de estiércol en el Fundo Nuevo Mundo, considerando variaciones estacionales en la dieta y en la cantidad de ganado, con el fin de garantizar datos más precisos para la operación del biodigestor; asimismo, resulta pertinente promover prácticas de manejo pecuario que optimicen la recolección y almacenamiento del estiércol, evitando pérdidas de biomasa y asegurando un flujo constante de materia prima para la generación de biogás, fortaleciendo así la sostenibilidad del sistema propuesto.
3. Se recomienda implementar el biodigestor BB30 con las medidas de zanja y protección estructural sugeridas por el fabricante, incluyendo techado liviano y aislamiento perimetral, a fin de optimizar el tiempo de retención y minimizar pérdidas térmicas; asimismo, se aconseja establecer un plan de uso eficiente del excedente de energía, ya sea para ampliar la electrificación interna del fundo, alimentar nuevas cargas productivas o destinar parte del biogás a usos térmicos (cocción, calentamiento de agua), con el fin de maximizar los beneficios técnicos, económicos y ambientales del sistema.
4. Se recomienda gestionar activamente la inscripción del proyecto en programas de mercado de carbono voluntario para asegurar los ingresos proyectados por reducción de emisiones, así como establecer un plan de mantenimiento preventivo y correctivo del generador y del sistema de tuberías de biogás, con énfasis en el overhaul programado al quinto año; además, se sugiere explorar alternativas de reinversión del excedente financiero en mejoras tecnológicas (sensores de presión, sistemas de monitoreo digital) que optimicen la operación y reduzcan riesgos de fallas.

VI. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Albitres, J. (2020). *Diseño de un sistema de generación eléctrica usando biogás para abastecer al centro poblado Nuevo Perú - Cajamarca 2019* [Tesis pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/46064>
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452–466. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
- Appels, L., Baeyens, J., Degreève, J., & Dewil, R. (2011). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755–781. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2008.06.002>
- Appels, L., Lauwers, J., Degreève, J., Helsen, L., Lievens, B., Willems, K., Van Impe, J., & Dewil, R. (2011). Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4295–4301. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.121>
- Bandgar, P., Jain, S., & Panwar, N. (2021). Current status, opportunities and challenges in anaerobic digestion in Indian context: An overview. *Bioresource Technology Reports*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100830>
- Barrera-Cardoso, E., Odales-Bernal, L., Carabeo-Pérez, A., & Alba-Reyes, Y. (2020). Recopilación de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural. *Tecnología Química*, 40(2), 303-321. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852020000200303&script=sci_arttext&tlng=pt
- Barrios, R. (2023). *Diseño de un sistema con biogás para generar energía eléctrica en el sector Santa Julia – C. P. Salitral, Motupe, Lambayeque* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la Universidad César Vallejo. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_ce5a8d6d79287e02d84125ea40bfad54

- Beraún-Espíritu, M., Moscoso-Paucarchuco, K., Gutiérrez-Gómez, E., Cárdenas-Bustamante, M., & González-Ríos, R. (2023). Energías limpias, negocios sucios: Un estudio del sector energético del Perú. *Prometeica-Revista de Filosofía y Ciencias*, 28, 172-184. <https://doi.org/10.34024/prometeica.2023.28.15395>
- Bernal, C. (2021). *Metodología de la investigación*. Cuarta edición. Ed. Editora Géminis Ltda. Bogotá – Colombia.
- Bond, T., & Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.003>
- Castañeda, D., y Herrera, J. (2019). *Diseño de un Sistema de Generación de Energía Eléctrica Utilizando Biogás Producido por Estiércol de Ganado Vacuno para la Hacienda el Potrero Bellavista – Jaén* [Tesis pregrado, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Jaén. <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/199>
- Congreso de la República del Perú. (2000). *Ley N° 27345 – Ley de Promoción del Uso Eficiente de la Energía*. Diario Oficial El Peruano.
- Congreso de la República del Perú. (2005). *Ley General del Ambiente, Ley N° 28611*. Diario Oficial El Peruano.
- Congreso de la República del Perú. (2006). *Ley N° 28832 – Ley para Asegurar el Desarrollo Eficiente de la Generación Eléctrica*. Diario Oficial El Peruano.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approach (5th ed.)*. SAGE Publications.
- Cucina, M., Castro, L., Escalante, H., Ferrer, I., & Garfí, M. (2021). Benefits and risks of agricultural reuse of digestates from plastic tubular digesters in Colombia. *Waste Management*, 135, 220–228. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.003>
- Cucina, M., Ziegler-Rodríguez, K., Josa, I., Castro, L., Escalante, H., & Garfí, A. (2021). Benefits and risks of agricultural reuse of digestates from plastic tubular digesters in Colombia. *Waste Management*, 135, 220–228. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.030>

- De Crescenzo, C., Marzocchella, A., Karatza, D., Molino, A., Ceron-Chafra, P., Lindeboom, R. E., & Musmarra, D. (2022). Modelling of autogenerative high-pressure anaerobic digestion in a batch reactor for the production of pressurised biogas. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 15(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s13068-022-02117-x>
- Delgado, N. (2018). *Propuesta de aprovechamiento de biogás obtenido a partir de estiércol de ganado vacuno para la implementación de un sistema de ventilación en la Asociación de Ganaderos de Lambayeque* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/1905>
- Ehouman, A., Kouakou, A., Coubaly, M., Konan, G., Bamba, A., Niamien, P., & Yao, B. (2023). Reduction of the corrosive character of a biogas: Elimination of hydrogen sulfide by filtration on activated carbon based on palm kernel shell. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 14(9), 1078–1095. http://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol14/vol14_N9/JMES-2023-14095-Ehouman.pdf
- Engineering for Change. (2023). *Sistema Biobolsa BB30. Engineering for Change Solutions Library*. <https://www.engineeringforchange.org/solutions/product/sistema-biobolsa-bb40/>
- Escobar, P., Astuñupa, S. y Huanca, W. (2018). *Metodología de la investigación científica*. (segunda edición). <https://www.scribd.com/document/431466573/INVESTIGACION>
- EstrategHaz. (2023). *El poder de la biodigestión: Sistema Biobolsa y su impacto en las comunidades y el planeta*. EstrategHaz. <https://www.estrateghaz.org/post/el-poder-de-la-biodigesti%C3%B3n-sistema-biobolsa-y-su-impacto-en-las-comunidades-y-el-planeta>
- FAO. (2008). *Biogas technology: A training manual for extension*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2024). *Small-scale anaerobic digestion: Guidelines for design and operation*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org>

- Ferrer, I., Gámiz, M., Almeida, M., & Ruiz, A. (2009). Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventanilla (Lima, Peru). *Waste Management*, 29(1), 168–173. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.014>
- Font-Palma, C. (2019). Methods for the Treatment of Cattle Manure - A Review. *C Journal of Carbon Research*, 5(2), 27. <https://doi.org/10.3390/c5020027>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2011). Manual de biogas. <https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>
- Garfi, M., Gelman, P., Comas, J., Carrasco, W., & Ferrer, I. (2011). Agricultural reuse of the digestate from low-cost tubular digesters in rural Andean communities. *Waste Management*, 31(12), 2584–2589. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.08.007>
- Garfi, M., Martí-Herrero, J., Garwood, A., & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 599–614. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.071>
- Gatica, J., Reyes, G., y Escobar, D. (2015). *Diseño y factibilidad de una planta de biogás en una vitivinícola* [Tesis pregrado, Universidad del Bío-Bío]. Repositorio Institucional de la Universidad del Bío-Bío. <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/1730>
- Gonzales, D., & Lozano, J. (2023). *Propuesta de un sistema generador de energía eléctrica con biogás producido por estiércol de cerdos en la Granja Don Víctor, Jaén* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Jaén. <https://hdl.handle.net/UNJ/611>
- Guevara, E. (2025). *Propuesta de biodigestores en las zonas rurales para producir biogás a partir del estiércol del ganado vacuno* [Tesis de licenciatura, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio Institucional de la Universidad Señor de Sipán <https://hdl.handle.net/20.500.12802/14739>
- Harirchi, S., Wainaina, S., Sar, T., Nojoumi, S. A., Parchami, M., Parchami, M., ... & Taherzadeh, M. J. (2022). Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): a review. *Bioengineered*, 13(3), 6521-6557. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2035986>

- Hayyat, U., Khan, M. U., Sultan, M., Zahid, U., Bhat, S. A., & Muzamil, M. (2024). A Review on Dry Anaerobic Digestion: Existing Technologies, Performance Factors, Challenges, and Recommendations. *Methane*, 3(1), 33-52. <http://dx.doi.org/10.3390/methane3010003>
- Hegazy, H., Saady, N., Khan, F., Zendejboudi, S., & Albayati, T. (2024). Biogas plants accidents: Analyzing occurrence, severity, and associations between 1990 and 2023. *Safety Science*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106597>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.
- Holm-Nielsen, J., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100(22), 5478–5484. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>
- Josimović, L., Prvulović, S., Djordjević, L., Bicok, I., Bakator, M., Premčevski, V., Šarenac, U., & Šeljmeši, D. (2024). Enhancing Biogas Plant Efficiency for the Production of Electrical and Thermal Energy. *Applied Sciences*, 14(13), 5858. <https://doi.org/10.3390/app14135858>
- Kadam, R., Jo, S., Lee, J., Khanthong, K., Jang, H., & Park, J. (2024). A review on the anaerobic co-digestion of livestock manures in the context of sustainable waste management. *Energies*, 17(3), 546. <https://doi.org/10.3390/en17030546>
- Katuwal, H., & Bohara, A. K. (2009). Biogas: A promising renewable technology and its impact on rural households in Nepal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2668–2674. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.002>
- Khanal, S. (2011). *Anaerobic biotechnology for bioenergy production: Principles and applications*. Wiley-Blackwell.
- Kiely, G., & Veza, J. (1999). *Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana de España.

- Koch, K., Plabst, M., Schmidt, A., Helmreich, B., & Drewes, J. (2016). Co-digestion of food waste in a municipal wastewater treatment plant: Comparison of batch tests and full-scale experiences. *Waste Management*, 47, 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.022>
- Lukehurst, C., & Bywater, A. (2015). Exploring the viability of small-scale anaerobic digesters in livestock farming (IEA Bioenergy Task 37 Technical Brochure). IEA Bioenergy. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2015/12/Small_Scale_RZ_web2.pdf
- Made-in-China.com. (2025). *Small Size Biogas Generator for Biogas Digester*. Shenzhen Teenwin Environment Co., Ltd. <https://teenwin.en.made-in-china.com/product/myjQICILHnWD/China-Small-Size-Biogas-Generator-for-Biogas-Digester.html>
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Mapantsela, Y., Mukumba, P., Oibileke, K., & Lethole, N. (2024). Portable biogas digester: a review. *Gases*, 4(3), 205-223. <https://doi.org/10.3390/gases4030012>
- Martí-Herrero, J., Chipana, M., Cuevas, C., Paco, G., Serrano, V., Zymla, B., Heising, K., Sologuren, J., & Gamarra, A. (2014). Low-cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia. *Renewable Energy*, 71, 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.036>
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S., & Astals, S. (2011). Codigestion of solid wastes: a review of its uses and perspectives including modeling. *Critical Reviews in Biotechnology*, 31(2):99-111. <https://doi.org/10.3109/07388551.2010.525496>
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412–427. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>

- Meegoda, J., Chande, C., & Bakshi, I. (2025). Biodigesters for Sustainable Food Waste Management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(3), 382. <https://doi.org/10.3390/ijerph22030382>
- Mohammadi, K., Vaiškūnaitė, R., & Zigmontienė, A. (2025). Efficiency of Hydrogen Sulfide Removal from Biogas Using a Laboratory-Scale Biofilter Packed with Biochar, Cellular Concrete Waste, or Polyurethane Foam: A COMSOL Simulation Study. *Processes*, 13(2), 329. <https://doi.org/10.3390/pr13020329>
- Møller, H., Sommer, S., & Ahring, B. (2004). Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass and Bioenergy*, 26(5), 485-495. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.008>
- Mustafi, N., & Agarwal, A. (2020). Biogas for transport sector: current status, barriers, and path forward for large-scale adaptation. *Alternative Fuels and Their Utilization Strategies in Internal Combustion Engines. Energy, Environment, and Sustainability. Springer, Singapore.* https://doi.org/10.1007/978-981-15-0418-1_13
- Ñaupas, H., Palacios, J., Romero, H., Valdivia, M. (2018). *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis.* Ediciones de la U. <http://www.ebooks7-24.com/?il=8046>
- Niño, V. (2019). *Metodología de la investigación, diseño, ejecución e informe* (2da ed.). Ediciones de la U. https://books.google.com.pe/books?id=WCwaEAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=metodolog%C3%ADa+de+la+investigaci%C3%B3n&hl=es419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=metodolog%C3%ADa%20de%20la%20investigaci%C3%B3n&f=false
- Noriega, C. (2023). Revisión sistemática de la valorización del biogás de residuos sólidos del relleno sanitario Portillo Grande. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 26(51). <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.25264>
- Obileke, K., Makaka, G., Nwokolo, N., Meyer, E., & Mukumba, P. (2022). Economic analysis of biogas production via biogas digester made from composite material. *ChemEngineering*, 6(5), 67. <https://doi.org/10.3390/chemengineering6050067>

- Oladunni, A., Oladeji, O., & Orhadahwe, T. (2025). Effect of hydraulic retention time and substrate-to-inoculum ratio on batch anaerobic digestion of goat manure: Response surface methodology optimization. *European Journal of Sustainable Development Research*, 9(3). <https://doi.org/10.29333/ejosdr/16337>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas.
- Palomino, J., Peña, D., Zevallos, G., & Orizano, L. (2019). *Metología de la investigación* (2.da ed.). San Marcos. http://www.sancristoballibros.com/libro/metodologia-de-la-investigacion_82424
- Pavan, M., Ramos, D., Soares, M., Barufi, C., & Carvalho, M. (2021). Barriers to broaden the electricity production from biomass and biogas in Brazil. *Production*, 31. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20210064>
- Pérez, M. (2010). *Estudio y diseño de un biodigestor para la aplicación en pequeños ganaderos y lecheros* [Tesis pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional de la Universidad de Chile. http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103926/cf-perez_jm.pdf?sequence=3
- Rajendran, K., Aslanzadeh, S., & Taherzadeh, M. (2012). Household biogas digesters—A review. *Energies*, 5(8), 2911–2942. <https://doi.org/10.3390/en5082911>
- Ramírez, J., y Calles, R. (2021). *Manual de metodología de la investigación en negocios internacionales*. Ecoe Ediciones. https://books.google.com.pe/books?id=GT4xEAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=metodolog%C3%ADa+de+la+investigaci%C3%B3n&hl=es419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=metodolog%C3%ADa%20de%20la%20investigaci%C3%B3n&f=false
- Rocamora, I., Wagland, S., Villa, R., Simpson, E., Fernández, O., & Bajón-Fernández, Y. (2020). Dry anaerobic digestion of organic waste: A review of operational parameters and their impact on process performance. *Bioresour Technol*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122681>

- Saravia, S., de la Hoz, J., Fernández, D., Llavona, A., Martín, H., Montañez, A., ... & Sarmanto, N. (2024). *Incentivos y oportunidades en el marco regulatorio para el aprovechamiento energético del biogás producido en plantas de tratamiento de aguas residuales en países seleccionados de América Latina y el Caribe*. Repositorio digital CEPAL. <https://hdl.handle.net/11362/80404>
- Schnürer, A., & Jarvis, Å. (2017). *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. *Swedish Waste Management* U2009:03. http://www.biogasmax.eu/media/microbiological_handbook_for_biogasplants.pdf
- Sistema.bio. (2023). *Catálogo de biodigestores Sistema Biobolsa*. Sistema.bio. <https://sistema.bio/nuestro-catalogo/>
- Sistema.bio. (2024). *Ficha técnica y catálogo actualizado de modelos de biodigestores*. Sistema.bio. https://sistema.bio/wp-content/uploads/1907_MEXICO_CATALOGO_compressed.pdf
- Solargis. (2021). Solar resource maps & GIS data: Peru. Solargis. <https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=peru>
- Torres, Y. (2024). *Diseño de un sistema de bombeo de agua con energía fotovoltaica para riego agrícola de cacao en Bagua Grande, Utcubamba* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Universidad Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/15417>
- Triolo, J., Sommer, S., Møller, H., Weisbjerg, M., & Jiang, Y. (2011). A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: Influence of lignin concentration on methane production potential. *Bioresource Technology*, 102(20), 9395–9402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.026>
- Ulukardesler, A. (2023). Anaerobic co-digestion of grass and cow manure: Kinetic and GHG calculations. *Scientific Reports*, 13, 6320. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33169-0>
- Ulukardesler, A. (2023). Anaerobic co-digestion of grass and cow manure: Kinetic and GHG calculations. *Scientific Reports*, 13(1), 6320. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33169-0>

- Valdez, Y., & Lozano, D. (2023). *Producción de biogás mediante combinación de estiércol vacuno y de cuy en la región Moquegua* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio Institucional de la Universidad Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/14035>
- Varol, A., & Ugurlu, A. (2017). Comparative evaluation of biogas production from dairy manure and co-digestion with maize silage by CSTR and new anaerobic hybrid reactor. *Engineering in Life Sciences*, 17(4), 402–412. <https://doi.org/10.1002/elsc.201500187>
- Vásquez, S. (2020). *Diseño de un sistema de generación eléctrica usando biogás para abastecer de energía al Fundo San José – Cajamarca 2019* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la Universidad César Vallejo. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_f00e7b1f764d2c6c6ce1e04bd4e3e2cd
- Velásquez, A. (2020). *Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de residuos de ganado porcino* [Tesis pregrado, Universidad Antonio Nariño]. Repositorio institucional de la Universidad Antonio Nariño. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/3109>
- Wang, H., Aguirre-Villegas, H., Larson, R., & Alkan-Ozkaynak, A. (2019). Physical Properties of Dairy Manure Pre- and Post-Anaerobic Digestion. *Applied Sciences*, 9(13), 2703. <https://doi.org/10.3390/app9132703>
- Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849–860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
- Wisconsin Department of Natural Resources. (2016). *Biological Solids and Sludges –Handling, Processing, and Reuse Study Guide*. <https://dnr.wisconsin.gov/sites/default/files/topic/OpCert/StudyGuideBiosolids.pdf>
- Yadvika, S., Sreekrishnan, T., Kohli, S., & Rana, V. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques – A review. *Bioresource Technology*, 95(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.010>
- Zhou, M., Liu, J., Tang, A., & You, X. (2024). Capacity demand analysis of rural biogas power generation system with independent operation considering source-load uncertainty. *Energies*, 17(8), 1880. <https://doi.org/10.3390/en17081880>

AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindaros la salud, la fortaleza y la perseverancia necesarias para culminar esta investigación.

A nuestra familia, por su apoyo incondicional, por sus palabras de aliento y por ser la motivación constante para seguir adelante en nuestra formación académica.

Al asesor de tesis, quien con paciencia, orientación y conocimiento supo guiarnos en cada etapa del desarrollo de este trabajo, contribuyendo con observaciones valiosas y motivándonos a alcanzar un nivel académico exigente y responsable.

A los docentes de la Universidad, quienes a lo largo de nuestra carrera compartieron sus enseñanzas con dedicación y compromiso, transmitiéndonos no solo conocimientos técnicos, sino también valores que hoy se reflejan en este logro académico.

Finalmente, a nuestros compañeros y amigos, por acompañarme en este proceso con su apoyo y colaboración.

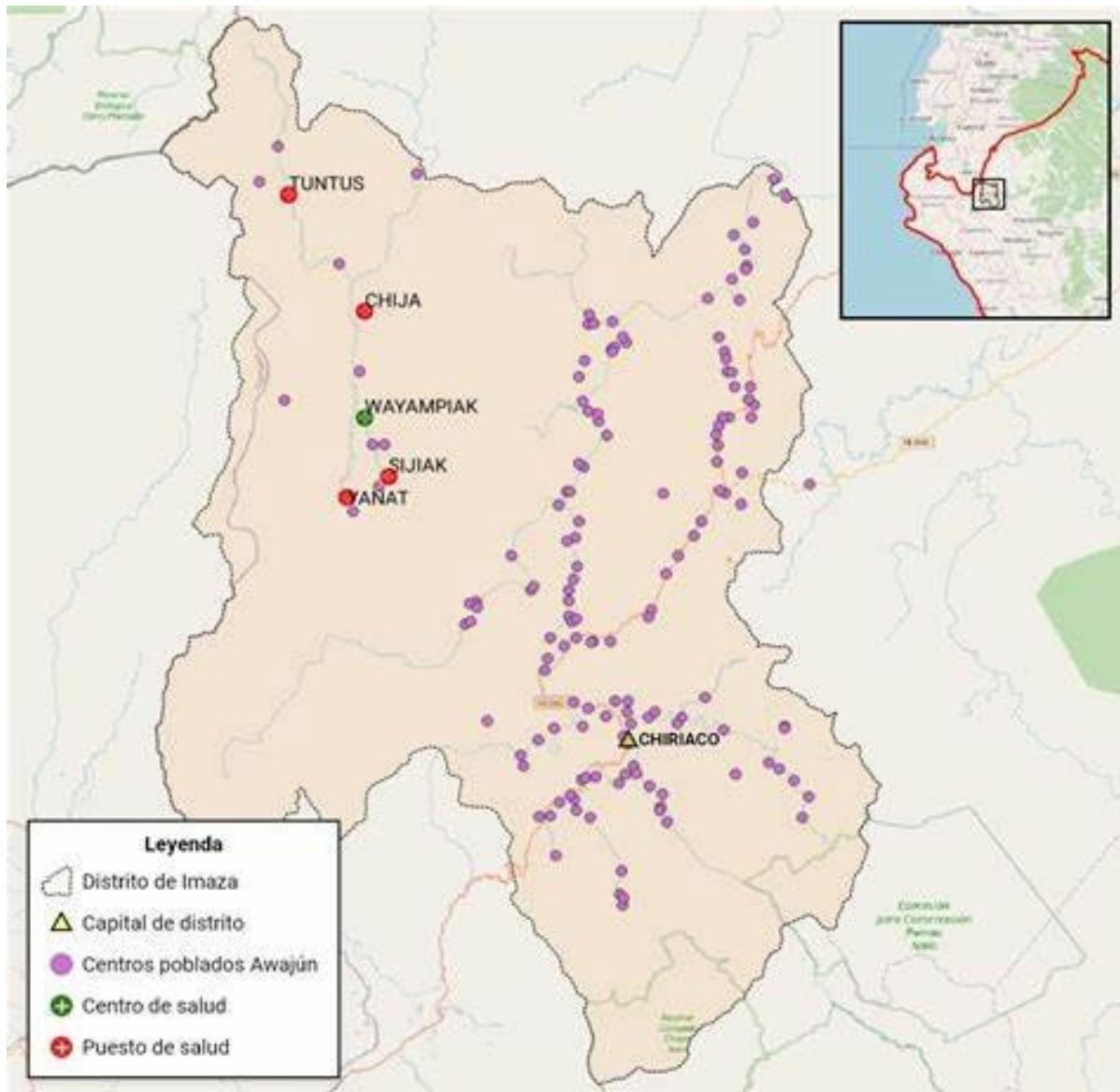
DEDICATORIA

A Dios, por ser la luz que guía nuestros pasos, por darnos la fortaleza en los momentos de dificultad y la esperanza para seguir adelante, sin tu infinita bondad y amor, este logro no habría sido posible.

A nuestras familias, pilar fundamental de nuestras vidas, quienes con amor, sacrificio y paciencia nos brindaron siempre su apoyo incondicional; a nuestros padres, por enseñarnos con su ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia; a nuestros hermanos, por ser fuente de motivación y compañía en cada etapa de este proceso; este trabajo no solo representa nuestro esfuerzo, sino también el de ustedes, que han estado con nosotros en cada paso.

ANEXOS

Anexo 1. Distrito de Imaza



Anexo 2. Radiación solar

MAPA DE RECURSO SOLAR

IRRADIACIÓN DIRECTA NORMAL PERÚ



ESMAP

SOLARGIS



Este mapa está publicado por el Grupo Banco Mundial, financiado por ESMAP, y preparado por Solargis. Para más información y términos de uso, por favor visite <http://globalsolaratlas.info>.

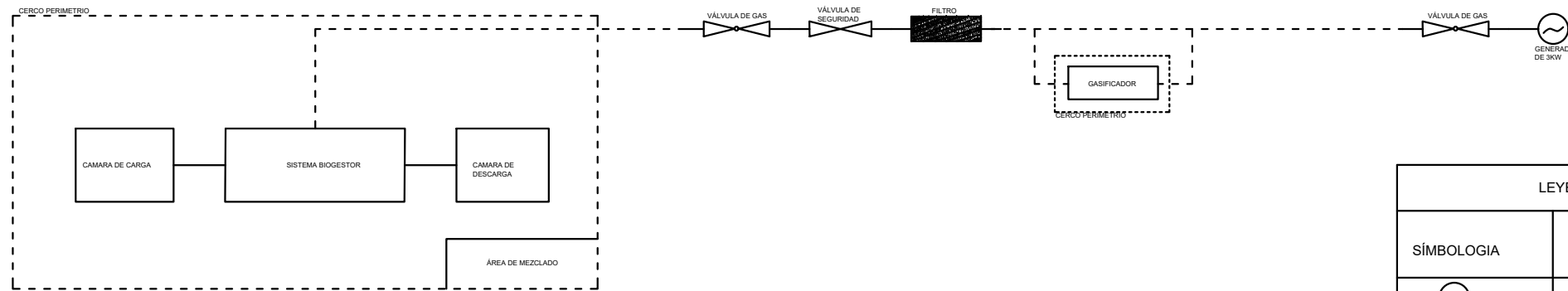
Anexo 3. Zona de estudio





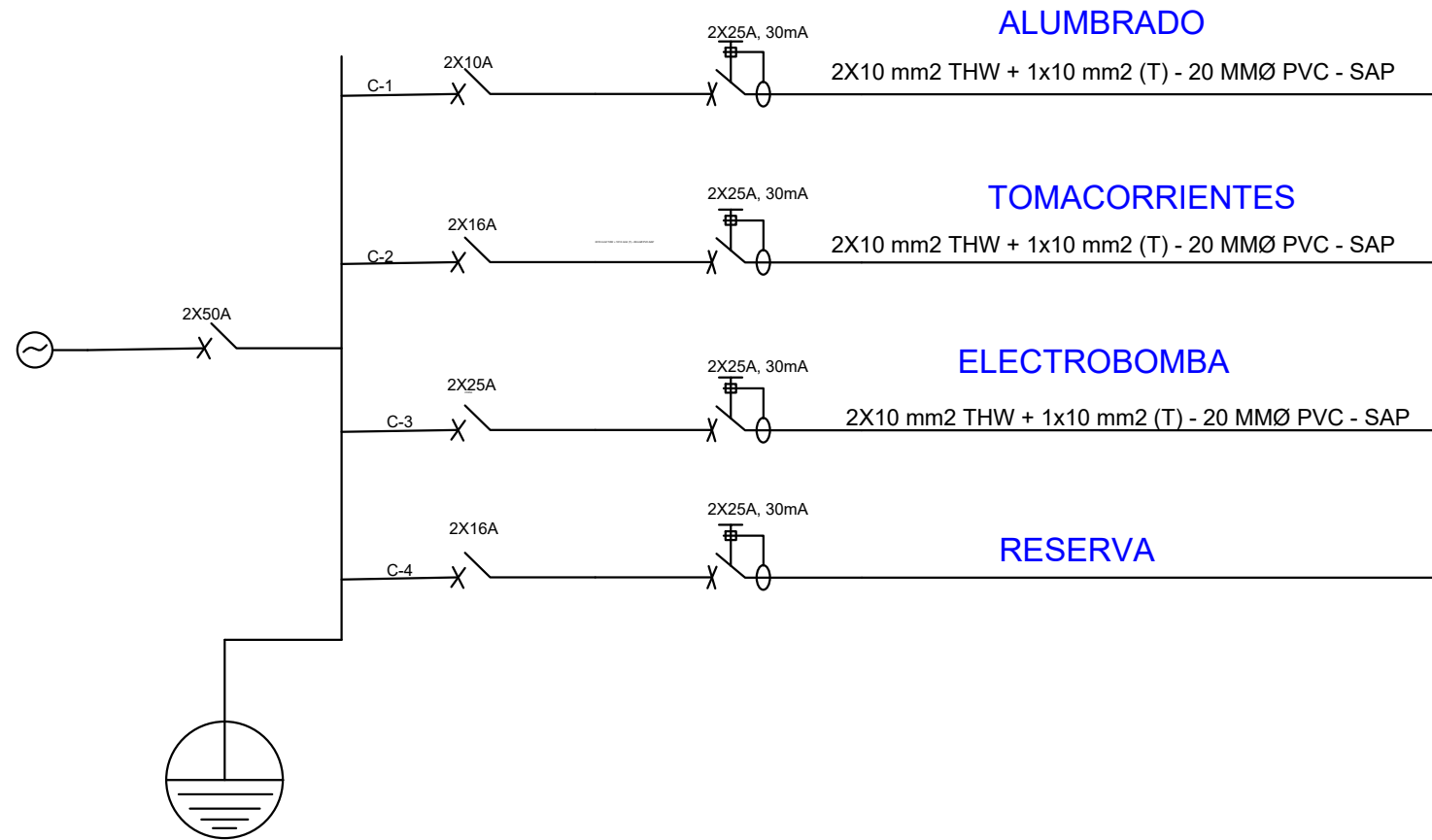
Anexo 4. Planos

DIAGRAMA UNIFILAR SISTEMA DE GAS



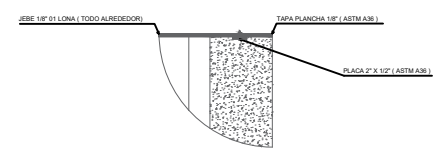
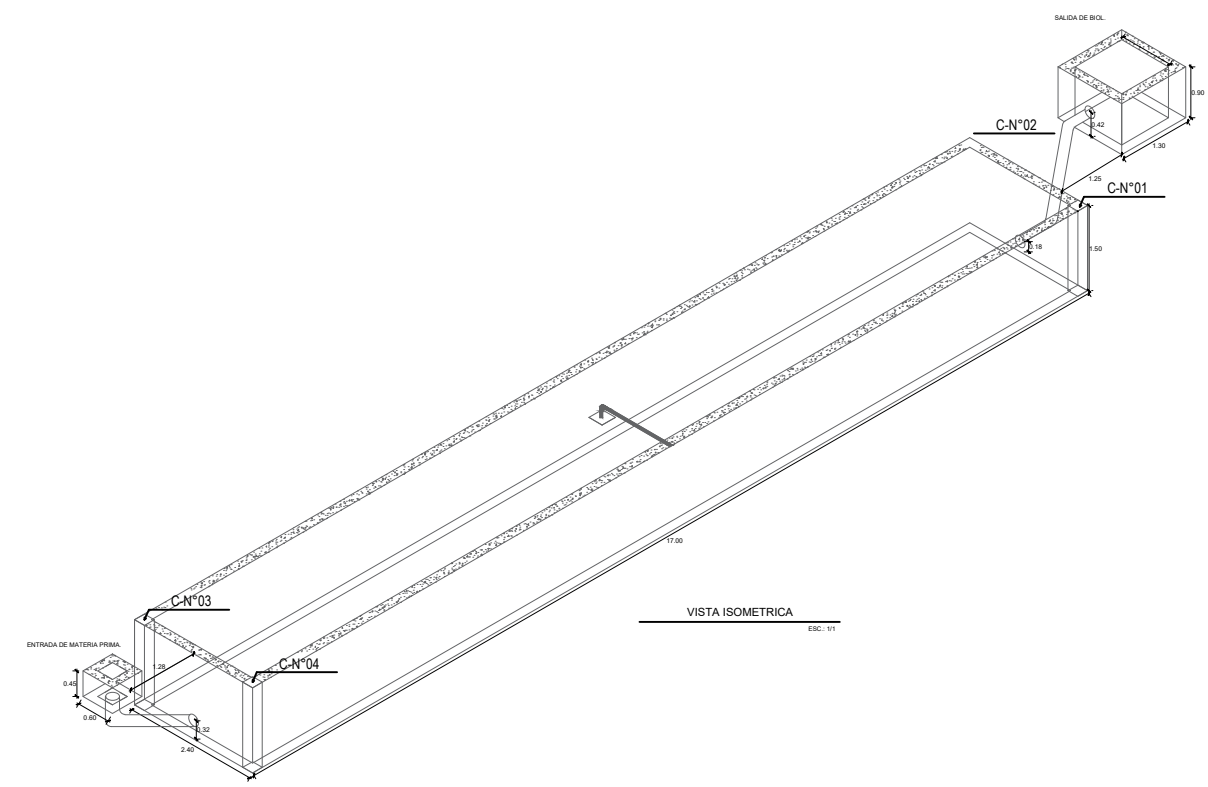
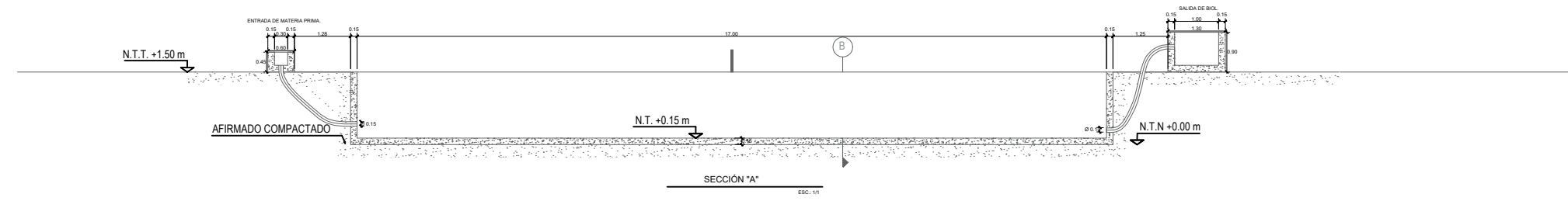
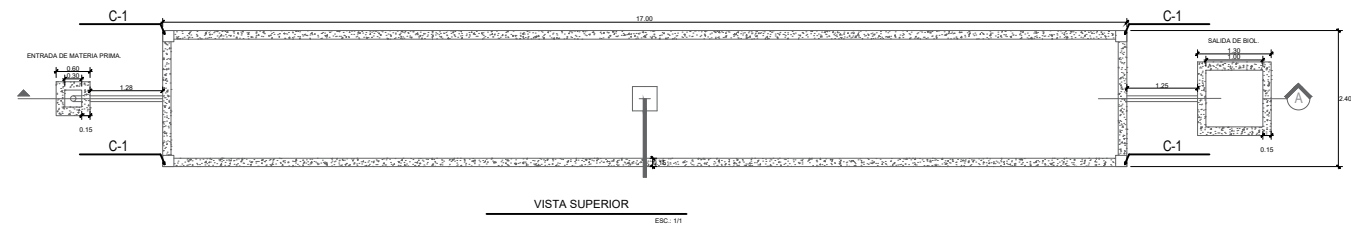
LEYENDA	
SÍMBOLOGIA	DESCRIPCIÓN
	GENERADOR
	FILTRO
	VÁLVULA DE GAS
	VÁLVULA DE SEGURIDAD

DIAGRAMA UNIFILAR SISTEMA ELÉCTRICO

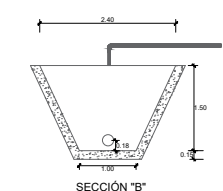


LEYENDA	
SÍMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
	INTERRUPTOR DIFERENCIAL
	INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO
	GENERADOR
	PUESTA A TIERRA

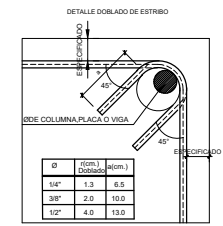
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MÉCANICA Y ELÉCTRICA		
TESIS: "PROPUESTA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS PARA EL SUMINISTRO ELÉCTRICO DEL FUNDO NUEVO MUNDO, IMAZA-AMAZONAS"			
TESISTAS	JAIRO URIARTE FERNÁNDEZ PEDRO ELI OMAR FLOREZ RAMÍREZ	ESCALA	
PLANO	DIAGRAMA UNIFILAR	FECHA: SEPTIMBRE DEL 2025	1:1



ESPECIFICACIONES DETALLE X
 ESPARRAGO DE 1/2" SOLDADO EN PLACA CADA 200 mm



CUADRO DE COLUMNA - SC 105	
TIPO	C-1
SECCION	
REFUERZO	4 Ø 1/2"
ESTRIBOS	Ø 3/8" 1Ø5+7Ø10+5Ø15 +R@20 cm Labo



NOTA
 ESPESOR TÍPICO DE MUROS 0.16 m
 ESPESOR TÍPICO DE COLUMNAS 0.2 m x 0.20 m

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
 LOS MUROS SERÁN HECHOS DE LADRILLO
 LOSA DE CONCRETO PARA BASE Y TAPA, $f_c = 175 \text{ Kg/cm}^2$

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

TESIS: "PROPUESTA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BIÓGAS PARA EL SUMINISTRO ELÉCTRICO DEL FUNDO NUEVO MUNDO, BAJA, AMAZONAS"		
TESISITAS: JAIRO URARTE FERNÁNDEZ PEDRO ELI OMAR FLORES RAMÍREZ	ESCALA: 	
PLANO: DETALLE DEL BIOGESTOR	FECHA: SEPTIEMBRE DEL 2025	1:1