

Techno-economic design and validation of a 70 m³ concrete biodigester for the co-digestion of pig manure and organic waste in a 10 kWe biorefinery

Yoisdell Castillo Alvarez^{1*}, Juan Pablo Gómez Montoya¹

¹Universidad Tecnológica del Perú

*c19773@utp.edu.pe

Abstract– Pig farming in the Ventanilla pig park (Callao, Peru) generates large volumes of manure that are currently managed in a precarious manner, with diffuse emissions of methane, leachates, and socio-environmental conflicts in a densely populated peri-urban area. Although biogas utilization offers a sustainable alternative, most of the solutions available to small and medium-sized producers are based on empirical designs, without clear criteria for organic load, hydraulics, or structural safety. This work presents the design and full-scale construction of a cylindrical concrete biodigester as a demonstration module to valorize manure from the Ventanilla pig farm and power a 10 kWe electric generator. The reactor is 5.0 m high and 3.8 m in internal diameter with a hemispherical dome, reaching a total internal volume of approximately 71 m³; of this volume, 70% is used for digestion liquor and 30% for biogas storage. The process sizing is based on a volumetric organic load of 2.5 kgSV/m³-day and a hydraulic retention time of approximately 23 days, considering 65 kg pigs with manure production of 8% of live weight, 6% dry matter, and 95% volatile solids. Under these assumptions, the system is designed to treat the manure of around 420 pigs, with a theoretical production of 43–44 m³/day of biogas (0.35 m³/kgSV), equivalent to about 96 kWh/day of electricity, sufficient to operate the 10 kWe generator for 9–10 hours per day. The civil plant already built and the planned integration of agitation equipment, gas hood, biogas lines, and generator set make this module a replicable demonstration platform for reducing environmental impacts and improving energy security in peri-urban pig farms.

Keywords– Anaerobic digestion, biogas, co-digestion of organic waste, concrete biodigesters, technical-economic evaluation.

Diseño tecnoeconómico y validación de un biodigestor de concreto de 70 m³ para la codigestión de estiércol porcino y residuos orgánicos en una biorrefinería de 10 kWe

Yoisdel Castillo Alvarez^{1*}, Juan Pablo Gómez Montoya¹

¹Universidad Tecnológica del Perú

*c19773@utp.edu.pe

Resumen—La actividad porcina en el parque porcino de Ventanilla (Callao, Perú) genera grandes volúmenes de estiércol que actualmente se gestionan de forma precaria, con emisiones difusas de metano, lixiviados y conflictos socioambientales en una zona periurbana densamente poblada. Aunque el aprovechamiento del biogás ofrece una alternativa sostenible, la mayoría de las soluciones disponibles para pequeños y medianos productores se basa en diseños empíricos, sin criterios claros de carga orgánica, hidráulica ni de seguridad estructural. Este trabajo presenta el diseño y la construcción a escala real de un biodigestor cilíndrico de concreto como módulo demostrativo para valorizar el estiércol del parque porcino de Ventanilla y accionar un generador eléctrico de 10 kWe. El reactor construido posee 5,0 m de altura y 3,8 m de diámetro interno con cúpula semiesférica, alcanzando un volumen interno total cercano a 71 m³; de este volumen, el 70 % se destina al licor de digestión y el 30 % al almacenamiento de biogás. El dimensionamiento de proceso se basa en una carga orgánica volumétrica de 2,5 kgSV/m³-día y un tiempo de retención hidráulico de aproximadamente 23 días, considerando cerdos de 65 kg con producción de estiércol del 8 % del peso vivo, 6 % de materia seca y 95 % de sólidos volátiles. Bajo estos supuestos, el sistema está diseñado para tratar el estiércol de alrededor de 420 cerdos, con una producción teórica de 43–44 m³/día de biogás (0,35 m³/kgSV), equivalente a unos 96 kWh/día de electricidad, suficientes para operar el generador de 10 kWe durante 9–10 horas diarias. La planta civil ya ejecutada y la integración prevista de equipos de agitación, campana de gas, líneas de biogás y grupo electrógeno convierten este módulo en una plataforma demostrativa replicable para reducir impactos ambientales y mejorar la seguridad energética en parques porcinos periurbanos.

Keywords—Digestión anaeróbica, biogás, codigestión de residuos orgánicos, biodigestores de concreto, evaluación técnico-económica.

I. INTRODUCCION

La acelerada expansión de la población, la urbanización y la intensificación de los sistemas agropecuarios han incrementado de manera sostenida la generación de residuos biodegradables, tanto urbanos como rurales. Los modelos de gestión predominantes, basados en la recolección y disposición final en rellenos sanitarios o botaderos, reproducen una bioeconomía lineal sustentada en combustibles fósiles y en el uso ineficiente de los recursos, contribuyendo de forma significativa a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), especialmente

metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) [1]– [2]. En los países de ingresos bajos y medios, la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales suele superar el 50 % del volumen total y su manejo inadecuado genera lixiviados, olores, proliferación de vectores y conflictos socioambientales en las periferias urbanas [3], [4].

Frente a este escenario, la Digestión Anaeróbica (DA) se ha consolidado como una tecnología clave de la bioeconomía circular para el tratamiento de residuos biodegradables, al permitir la estabilización de la materia orgánica y la producción simultánea de biogás y digestato aprovechable como biofertilizante [5]– [6]. Experiencias en Europa, Asia y América Latina demuestran que la DA aplicada a residuos de alimentos, fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, lodos de depuradora y estiércoles permite alcanzar remociones elevadas de sólidos volátiles y demanda química de oxígeno, a la vez que genera biogás en rangos típicos de 0,15–0,60 m³-kg⁻¹ SV y contenidos de metano entre 55–65 % [7]– [8]– [9].

Dentro del conjunto de flujos biodegradables, los estiércoles pecuarios y los residuos agroalimentarios destacan por su elevado potencial metanogénico y su importante contribución a las emisiones difusas de CH₄ cuando no se tratan adecuadamente [10], [11], [12]. La co-digestión de estiércoles con residuos de frutas, verduras y restos de comida ha demostrado mejorar el balance de nutrientes, incrementar la biodegradabilidad global y estabilizar el proceso frente a la digestión monofásica de un único sustrato, obteniéndose incrementos significativos en la producción de biogás y en la calidad del digestato [5], [13], [14]. Diversos estudios experimentales y modelados cinéticos han confirmado que la combinación adecuada de sustratos, junto con el control de la carga orgánica volumétrica, el tiempo de Retención Hidráulica (TRH) y la temperatura, es determinante para maximizar el rendimiento energético y minimizar fenómenos de inhibición por amoníaco o acumulación de ácidos grasos volátiles [15], [16], [17].

La producción porcina intensiva es particularmente relevante desde el punto de vista ambiental, debido al gran volumen de purines generados y a su elevada carga orgánica y nitrogenada. En unidades productivas de pequeña y mediana escala,

típicas de América Latina, el estiércol porcino suele manejarse mediante almacenamiento en fosas, aplicación directa al suelo o descarga a cauces superficiales, prácticas que favorecen la emisión de CH_4 y N_2O , así como la contaminación de aguas y suelos [18], [14]. La valorización conjunta de purines porcinos y residuos orgánicos urbanos o agroindustriales, especialmente en contextos periurbanos, continúa menos explorada a pesar de su elevado potencial de mitigación de impactos y generación de valor añadido [15], [7], [19].

En paralelo, la literatura documenta la amplia difusión de biodigestores de bajo costo particularmente del tipo tubular o tipo chino en regiones rurales de América Latina, África y Asia, donde se utilizan para cocinar, iluminación y producción de fertilizantes orgánicos [20], [1]. No obstante, diversos estudios señalan que muchos de estos sistemas presentan problemas estructurales y de operación: dimensionamiento empírico, ausencia de criterios claros para definir el volumen útil y el espacio libre para gas, diseños hidráulicos que favorecen la estratificación y el arrastre de sólidos, dependencia excesiva de la intervención manual y escasa instrumentación para el seguimiento de variables críticas del proceso [21], [22], [23]. Estas limitaciones reducen la confiabilidad y la vida útil de las instalaciones, y dificultan su integración en esquemas más ambiciosos de generación distribuida de energía y de gestión integrada de residuos [24], [25], [26].

A pesar de la existencia de numerosos estudios de potencial teórico, ensayos de biodegradabilidad y análisis de casos con digestores de pequeña escala, se identifica una brecha importante en la literatura relacionada con la evaluación integral de biodigestores de volumen intermedio (del orden de 50–100 m^3) construidos en concreto, que procesan mezclas reales en condiciones climáticas áridas o semiáridas, y que están acoplados a sistemas de generación eléctrica en el rango de 5–20 kWe [27], [28]. En particular, son escasos los trabajos que combinen: (i) un diseño hidráulico y geométrico explícito basado en parámetros de carga orgánica volumétrica y TRH derivados de la literatura; una estrategia de operación y agitación adaptada a las condiciones locales; y un análisis tecno-económico detallado que incorpore tanto los flujos de caja asociados a la energía eléctrica generada como la valorización parcial del biofertilizante líquido [29], [30], [31].

En este marco, el presente estudio aborda la evaluación técnico-económica de un biodigestor de concreto de 70 m^3 de capacidad nominal, instalado en un parque porcino del Perú, concebido como núcleo de una biorrefinería a pequeña escala para la co-digestión de purines de cerdo y residuos orgánicos. El trabajo se centra en: el dimensionamiento hidráulico y geométrico del reactor, definiendo el volumen líquido de operación y el espacio libre para gas a partir de la carga orgánica diaria y de criterios de diseño derivados de la literatura; la estimación del potencial de producción de biogás y su aprovechamiento en un generador de 10 kWe; y el análisis de la viabilidad económica mediante indicadores como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el periodo de recuperación descontado. De este modo, se busca aportar evidencia cuantitativa y reproducible sobre el

desempeño de biodigestores de escala intermedia en contextos porcinos periurbanos, contribuyendo a cerrar la brecha entre los enfoques conceptuales de economía circular y la implementación real de soluciones de gestión sostenible de residuos en países en desarrollo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el Parque Porcino de Ventanilla, ubicado en el distrito de Ventanilla, provincia constitucional del Callao, en la franja costera árida al norte de Lima. Esta zona concentra un elevado número de pequeñas unidades productoras de cerdos que, desde hace décadas, disponen el estiércol a cielo abierto, generando emisiones de olores, lixiviados y gases de efecto invernadero que afectan directamente a la población circundante y agravan la vulnerabilidad ambiental de la comunidad. En este contexto, la Figura 1 muestra la localización geográfica del parque porcino y el área destinada a la instalación del biodigestor de 70 m^3 dentro del proyecto de biorrefinería, proporcionando el marco espacial donde se implementará la conversión de los residuos orgánicos en biogás y bioabonos para la comunidad de Ventanilla.

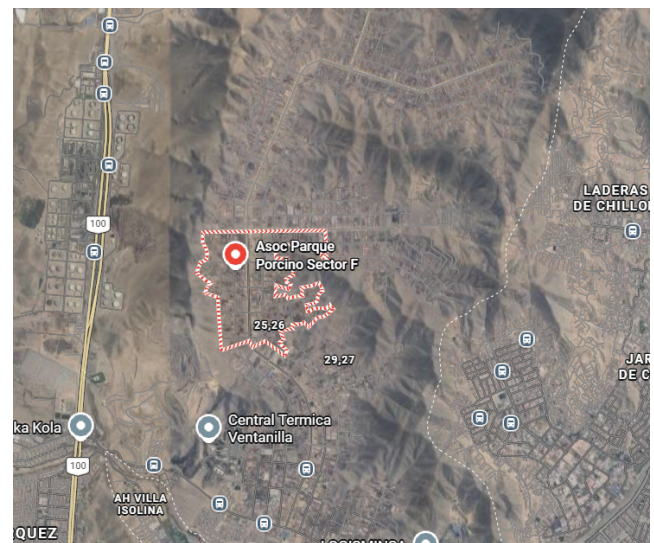


Figura 1: Vista seccional del biodigestor de concreto de 70 m^3 con sistema de alimentación, agitación y almacenamiento de biogás.

II-A. Dimensionamiento del biodigestor

II-A1. Tipos de biodigestores:

- **Biodigestor tipo indio:** consiste en una estructura cilíndrica con un gasómetro flotante que mantiene la presión relativamente constante. Su desventaja principal es la corrosión del techo metálico [17].
- **Biodigestor tipo chino:** presenta un domo fijo construido en ladrillo o concreto, enterrado bajo tierra. Es robusto y de bajo costo de operación, aunque la presión del gas varía según el volumen almacenado, y las reparaciones estructurales pueden resultar complicadas [32].

- **Biodigestores de geomembrana o tubulares:** fabricados en polietileno o Policloruro de Vinilo (PVC), se instalan fácilmente y resultan económicos, siendo una alternativa popular en zonas rurales. Sin embargo, su vida útil es limitada (aproximadamente 5–10 años) [33].
- **Biodigestores prefabricados de fibra de vidrio o plástico reforzado:** poseen mayor durabilidad y facilidad de instalación, aunque su costo es significativamente mayor [13].

II-A2. Diseño y dimensionamiento del biodigestor: El dimensionamiento parte de la estimación de la producción específica de estiércol por animal, que se obtiene como función del peso vivo y de la fracción excretada diariamente, según la ecuación (1) [7]:

$$m_{M,1} = f_M W_p \quad (1)$$

donde:

- $m_{M,1}$: producción específica de estiércol húmedo por animal $[\text{kg animal}^{-1} \text{d}^{-1}]$.
- f_M : fracción del peso vivo excretada diariamente como estiércol húmedo $[\text{kg estiércol kg}^{-1} \text{peso vivo}]$.
- W_p : peso vivo promedio del cerdo $[\text{kg}]$.

A partir de la producción específica, la producción total diaria de estiércol húmedo para un lote de N animales se determina mediante la ecuación (2):

$$\dot{M}_M = N m_{M,1} \quad (2)$$

donde:

- $\dot{M}_M$: producción total diaria de estiércol húmedo $[\text{kg d}^{-1}]$.
- N : número de cerdos en el sistema $[-]$.
- $m_{M,1}$: producción específica de estiércol húmedo por animal $[\text{kg animal}^{-1} \text{d}^{-1}]$.

El flujo diario de materia seca (sólidos totales) se calcula a partir de la producción de estiércol húmedo y de la fracción de sólidos, como se muestra en la ecuación (3) [34]:

$$\dot{M}_{TS} = \dot{M}_M x_{TS} \quad (3)$$

donde:

- $\dot{M}_{TS}$: flujo diario de materia seca (sólidos totales, TS) $[\text{kg}_{TS} \text{d}^{-1}]$.
- $\dot{M}_M$: producción total diaria de estiércol húmedo $[\text{kg d}^{-1}]$.
- x_{TS} : fracción de materia seca en la biomasa húmeda $[-]$.

A su vez, la masa diaria de sólidos volátiles que ingresa al sistema se obtiene multiplicando la materia seca por la fracción volátil, de acuerdo con la ecuación (4) [35]:

$$\dot{M}_{VS} = \dot{M}_{TS} x_{VS} \quad (4)$$

donde:

- $\dot{M}_{VS}$: flujo diario de sólidos volátiles (VS) $[\text{kg}_{VS} \text{d}^{-1}]$.
- $\dot{M}_{TS}$: flujo diario de materia seca (TS) $[\text{kg}_{TS} \text{d}^{-1}]$.

- x_{VS} : fracción de materia volátil sobre la materia seca $[-]$.

La relación entre la masa de VS aplicada y el volumen efectivo del reactor define la carga orgánica volumétrica aplicada, descrita en la ecuación (5) [1]:

$$L_V = \frac{\dot{M}_{VS}}{V_L} \quad (5)$$

donde:

- L_V : carga orgánica volumétrica aplicada $[\text{kg}_{VS} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}]$.
- $\dot{M}_{VS}$: flujo diario de sólidos volátiles $[\text{kg}_{VS} \text{d}^{-1}]$.
- V_L : volumen líquido efectivo del biodigestor $[\text{m}^3]$.

A partir de la carga de diseño, el volumen líquido requerido del biodigestor se obtiene despejando V_L de la ecuación anterior, como se muestra en la ecuación (6) [9]:

$$V_L = \frac{\dot{M}_{VS}}{L_V} \quad (6)$$

donde:

- V_L : volumen líquido requerido del biodigestor $[\text{m}^3]$.
- $\dot{M}_{VS}$: flujo diario de sólidos volátiles $[\text{kg}_{VS} \text{d}^{-1}]$.
- L_V : carga orgánica volumétrica de diseño $[\text{kg}_{VS} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}]$.

De forma equivalente, para un volumen líquido fijado, el número máximo de animales que puede admitir el biodigestor se calcula reordenando la expresión anterior, según la ecuación (7):

$$N = \frac{L_V V_L}{m_{M,1} x_{TS} x_{VS}} \quad (7)$$

donde:

- N : número máximo de cerdos que puede tratar el biodigestor $[-]$.
- L_V : carga orgánica volumétrica de diseño $[\text{kg}_{VS} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}]$.
- V_L : volumen líquido efectivo del biodigestor $[\text{m}^3]$.
- $m_{M,1}$: producción específica de estiércol húmedo por animal $[\text{kg animal}^{-1} \text{d}^{-1}]$.
- x_{TS} : fracción de materia seca en la biomasa húmeda $[-]$.
- x_{VS} : fracción de materia volátil sobre la materia seca $[-]$.

El caudal volumétrico de alimentación se obtiene relacionando la producción másica de estiércol húmedo con la densidad aparente del purín, como se indica en la ecuación (8) [29]:

$$Q_L = \frac{\dot{M}_M}{\rho} \quad (8)$$

donde:

- Q_L : caudal volumétrico de alimentación al biodigestor $[\text{m}^3 \text{d}^{-1}]$.
- $\dot{M}_M$: producción total diaria de estiércol húmedo $[\text{kg d}^{-1}]$.

- ρ : densidad aparente del purín $[\text{kg m}^{-3}]$.

Conocidos el volumen líquido y el caudal de alimentación, el tiempo de retención hidráulico del sistema se calcula mediante la ecuación (9) [3]:

$$TRH = \frac{V_L}{Q_L} \quad (9)$$

donde:

- TRH : tiempo de retención hidráulico [d].
- V_L : volumen líquido efectivo del biodigestor $[\text{m}^3]$.
- Q_L : caudal volumétrico de alimentación $[\text{m}^3 \text{d}^{-1}]$.

En cuanto a la geometría, el volumen del tramo cilíndrico del biodigestor se determina a partir del radio interno y la altura, según la ecuación (10) [1]:

$$V_{\text{cyl}} = \pi R^2 H \quad (10)$$

donde:

- V_{cyl} : volumen del tramo cilíndrico del biodigestor $[\text{m}^3]$.
- R : radio interno del cilindro [m].
- H : altura del cilindro [m].
- π : constante pi $[-]$.

El volumen de la cúpula semiesférica superior se estima asumiendo una semiesfera de radio R , de acuerdo con la ecuación (11) [1]:

$$V_{\text{hem}} = \frac{2}{3} \pi R^3 \quad (11)$$

donde:

- V_{hem} : volumen de la cúpula semiesférica $[\text{m}^3]$.
- R : radio interno de la semiesfera [m].
- π : constante pi $[-]$.

El volumen interno total del biodigestor se obtiene sumando los volúmenes cilíndrico y semiesférico, como se expresa en la ecuación (12) [1]:

$$V_T = V_{\text{cyl}} + V_{\text{hem}} \quad (12)$$

donde:

- V_T : volumen interno total del biodigestor $[\text{m}^3]$.
- V_{cyl} : volumen del tramo cilíndrico $[\text{m}^3]$.
- V_{hem} : volumen de la cúpula semiesférica $[\text{m}^3]$.

El volumen destinado al licor de digestión se define como una fracción del volumen total, α_L , tal como se indica en la ecuación (13) [1]:

$$V_L = \alpha_L V_T \quad (13)$$

donde:

- V_L : volumen destinado al licor de digestión $[\text{m}^3]$.
- α_L : fracción de volumen líquido del biodigestor $[-]$.
- V_T : volumen interno total del biodigestor $[\text{m}^3]$.

De forma análoga, el volumen disponible para almacenamiento de biogás se define como una fracción del volumen total, α_G , según la ecuación (14):

$$V_G = \alpha_G V_T \quad (14)$$

donde:

- V_G : volumen disponible para almacenamiento de biogás $[\text{m}^3]$.
- α_G : fracción de volumen destinada al gas $[-]$.
- V_T : volumen interno total del biodigestor $[\text{m}^3]$.

La producción teórica diaria de biogás se calcula a partir del rendimiento específico por unidad de sólidos volátiles añadidos, como se muestra en la ecuación (15) [3]:

$$Q_{\text{bg}} = Y_{\text{bg}} \dot{M}_{VS} \quad (15)$$

donde:

- Q_{bg} : producción diaria de biogás $[\text{m}^3 \text{d}^{-1}]$.
- Y_{bg} : rendimiento específico de biogás $[\text{m}^3 \text{kg}_{\text{VS}}^{-1}]$.
- $\dot{M}_{VS}$: flujo diario de sólidos volátiles $[\text{kg}_{\text{VS}} \text{d}^{-1}]$.

Finalmente, el potencial de generación eléctrica diaria se estima combinando la producción de biogás, su poder calorífico y la eficiencia del generador, de acuerdo con la ecuación (16):

$$E_{\text{el},d} = LHV_{\text{bg}} \eta_{\text{el}} Q_{\text{bg}} \quad (16)$$

donde:

- $E_{\text{el},d}$: energía eléctrica diaria generada $[\text{kWh d}^{-1}]$.
- LHV_{bg} : poder calorífico inferior del biogás $[\text{kWh m}^{-3}]$.
- η_{el} : eficiencia eléctrica del generador $[-]$.
- Q_{bg} : producción diaria de biogás $[\text{m}^3 \text{d}^{-1}]$.

II-B. H.1 Inversión inicial

La inversión inicial total del proyecto se obtiene sumando los costos de los principales componentes de la planta, según la ecuación (17) [16]:

$$I_0 = C_{\text{civ}} + C_{\text{mec}} + C_{\text{elec}} + C_{\text{aux}} + C_{\text{ingen}} \quad (17)$$

donde:

- I_0 : inversión inicial total del proyecto [USD].
- C_{civ} : costo de obras civiles (biodigestor, estructuras, cimentaciones) [USD].
- C_{mec} : costo de equipos mecánicos (agitadores, campana de gas, tuberías, válvulas) [USD].
- C_{elec} : costo del generador de 10 kW y sistema eléctrico asociado [USD].
- C_{aux} : costo de sistemas auxiliares (tratamiento de biogás, bombas, instrumentación, cercos) [USD].
- C_{ingen} : costos de ingeniería, supervisión, permisos e imprevistos [USD].

II-C. H.2 Ingresos anuales

Los beneficios anuales totales se calculan como la suma de los ingresos por energía eléctrica y por biofertilizante, de acuerdo con la ecuación (18) [16]:

$$B_t = B_{\text{el},t} + B_{\text{bf},t} \quad (18)$$

Los ingresos por energía eléctrica en el año t se obtienen a partir de la energía anual generada y el precio del kWh, según la ecuación (19) [36]:

$$B_{el,t} = E_{el,a} P_{el} \quad (19)$$

Los ingresos por biofertilizante se estiman a partir de la masa anual comercializable y su precio de venta, como se indica en la ecuación (20) [16]:

$$B_{bf,t} = M_{bf,a} P_{bf} \quad (20)$$

donde:

- B_t : beneficios totales en el año t [USD año⁻¹].
- $B_{el,t}$: ingresos por venta o ahorro de energía eléctrica en el año t [USD año⁻¹].
- $B_{bf,t}$: ingresos por venta de biofertilizante en el año t [USD año⁻¹].
- $E_{el,a}$: energía eléctrica generada anualmente [kWh año⁻¹].
- P_{el} : precio de la energía eléctrica [USD kWh⁻¹].
- $M_{bf,a}$: masa anual de biofertilizante vendible [t año⁻¹].
- P_{bf} : precio del biofertilizante [USD t⁻¹].

II-D. H.3 Costos de operación y mantenimiento

Los costos anuales de operación y mantenimiento se dividen en costos fijos y variables, como se presenta en la ecuación (21) [16]:

$$C_t = C_{fix,t} + C_{var,t} \quad (21)$$

donde:

- C_t : costos totales de operación y mantenimiento en el año t [USD año⁻¹].
- $C_{fix,t}$: costos fijos anuales (personal, seguros, mantenimiento preventivo) [USD año⁻¹].
- $C_{var,t}$: costos variables anuales (insumos, repuestos, energía auxiliar, consumibles) [USD año⁻¹].

II-E. H.4 Flujo de caja anual

El flujo de caja neto antes de financiamiento se define como la diferencia entre beneficios y costos, según la ecuación (22) [3]:

$$FC_t = B_t - C_t \quad (22)$$

donde:

- FC_t : flujo de caja neto en el año t [USD año⁻¹].
- B_t : beneficios totales en el año t [USD año⁻¹].
- C_t : costos totales de operación y mantenimiento en el año t [USD año⁻¹].

II-F. H.5 Tasa de descuento y factor de descuento

La tasa de descuento efectiva se obtiene sumando la tasa real libre de riesgo y un margen por riesgo del proyecto, de acuerdo con la ecuación (23) [3]:

$$D = R + m \quad (23)$$

A partir de D , el factor de descuento aplicable al flujo del año t se calcula mediante la ecuación (24) [16]:

$$f_{desc,t} = \frac{1}{(1 + D)^t} \quad (24)$$

donde:

- R : tasa de descuento real de referencia [año⁻¹].
- m : margen adicional por riesgo del proyecto [año⁻¹].
- D : tasa de descuento real con margen [año⁻¹].
- $f_{desc,t}$: factor de descuento aplicado al año t [-].

II-G. H.6 Flujo descontado, VAN y periodo de recuperación

El flujo de caja descontado en el año t se obtiene multiplicando el flujo de caja neto por el factor de descuento, como indica la ecuación (25) [3]:

$$FD_t = FC_t f_{desc,t} \quad (25)$$

El Valor Actual Neto (VAN) del proyecto se calcula sumando los flujos descontados e incorporando la inversión inicial, según la ecuación (26) [3]:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n FD_t \quad (26)$$

El flujo descontado acumulado hasta el año k se define en la ecuación (27) [3]:

$$FDA_k = \sum_{t=1}^k FD_t \quad (27)$$

El periodo de recuperación descontado PRI corresponde al menor año k en el que el flujo acumulado iguala o supera la inversión inicial, de acuerdo con la condición de la ecuación (28) [16]:

$$FDA_k \geq I_0 \quad (28)$$

donde:

- FD_t : flujo de caja descontado en el año t [USD].
- VAN : valor actual neto del proyecto [USD].
- n : horizonte de evaluación económica [años].
- FDA_k : flujo de caja descontado acumulado hasta el año k [USD].
- PRI : periodo de recuperación descontado [años].

II-H. H.7 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La tasa interna de retorno se define como la tasa r que hace nulo el VAN de los flujos de caja del proyecto, tal como se establece en la ecuación (29) [16]:

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} \quad (29)$$

donde:

- r : tasa interna de retorno (TIR) del proyecto [año⁻¹].
- I_0 : inversión inicial total [USD].
- FC_t : flujo de caja neto en el año t [USD año⁻¹].
- n : número de años considerados en la evaluación [años].

III. RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados del diseño y evaluación del biodigestor de concreto de 70 m³ instalado en el parque porcino de Ventanilla, considerando tanto su desempeño técnico como su comportamiento económico. Se analizan, en primer lugar, las condiciones de operación asociadas a la alimentación con purines de cerdo y residuos orgánicos, la estabilidad hidráulica del sistema y la carga orgánica aplicada sobre el volumen útil del reactor. Posteriormente se discute la capacidad del biodigestor para transformar estos residuos en biogás y energía eléctrica mediante un generador de 10 kW_e, así como el aprovechamiento del digestato como biofertilizante. Finalmente, se evalúa la rentabilidad del proyecto a partir de los flujos de caja generados a lo largo de la vida útil de la planta, con el fin de determinar su viabilidad como alternativa sostenible para la gestión de residuos en el contexto del parque porcino de Ventanilla.

En la Tabla 1 se presenta el dimensionamiento geométrico del biodigestor de concreto diseñado para el parque porcino de Ventanilla. El volumen total interno se fijó en 70 m³, de los cuales el 70 % se destina al licor de digestión y el 30 % se reserva como espacio libre para el almacenamiento de biogás. La tabla resume las principales dimensiones del reactor (diámetro y altura del tramo cilíndrico, espesor de muro y altura total) junto con los volúmenes líquido y de gas considerados para el diseño operativo.

Tabla I: Parámetros geométricos y volúmenes de diseño del biodigestor

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro interno del cilindro	D_i	4.25	m
Radio interno del cilindro / domo	R	2.13	m
Altura interna del tramo cilíndrico	H_c	5.00	m
Espesor del muro de concreto	e	0.25	m
Altura total aproximada (cilindro + domo)	H_t	7,1	m
Volumen total de diseño del biodigestor	V_T	70.0	m ³
Volumen de operación (70 % líquido)	V_L	49.0	m ³
Volumen libre para almacenamiento de biogás (30 %)	V_G	21.0	m ³

La Tabla II resume las condiciones de alimentación que gobiernan el diseño del biodigestor y permite cuantificar con

Tabla II: Parámetros de alimentación y carga orgánica para el dimensionamiento del biodigestor

Parámetro	Símbolo	Valor aprox.	Unidad
Peso vivo promedio por cerdo	W_P	65	kg/cerdo
Fracción de peso excretada como estiércol	f_M	0.08	kg/kg PV
Producción específica de estiércol por cerdo	$m_{M,1}$	5.2	kg/(cerdo · d)
Número de cerdos alimentando el biodigestor	N	413	cerdo
Producción total de estiércol húmedo	$\dot{M}_M$	2.15	t/d
Contenido de materia seca	x_{TS}	6	% p/p
Contenido de materia volátil sobre TS	x_{VS}	95	% p/p
Flujo de materia seca	$\dot{M}_{TS}$	0.129	t _{TS} /d
Flujo de sólidos volátiles	$\dot{M}_{VS}$	0.122	t _{VS} /d
Carga orgánica volumétrica aplicada	L_V	2.50	kg _{VS} m ⁻³ d ⁻¹
Caudal volumétrico de alimentación	Q_L	2.15	m ³ /d

claridad la carga orgánica que recibe el sistema. El peso vivo promedio de los cerdos se fija en 65 kg y se asume que el 8

El contenido de sólidos del purín es relativamente bajo (6 % de materia seca), pero con una fracción muy elevada de materia volátil (95 % sobre TS), lo que indica un sustrato altamente biodegradable y adecuado para la producción de biogás. De esta composición se derivan un flujo de 0,129 t_{TS}/d y 0,122 t_{VS}/d, valores que, distribuidos en el volumen líquido de operación del reactor, conducen a una carga orgánica volumétrica de 2,50 kg_{VS}·m³·d⁻¹. Esta carga se encuentra dentro del rango recomendado para digestores mesofílicos alimentados con purines porcinos, lo que sugiere que el sistema operará con buena estabilidad biológica. Finalmente, el caudal volumétrico de alimentación de 2,15 m³/d confirma la coherencia entre la masa de purín generada y el diseño hidráulico del biodigestor.

En la Tabla 3 se presentan las variables hidráulicas y de producción energética del sistema, derivadas del volumen de operación de 49 m³, la carga aplicada y el rendimiento específico de biogás. Estos parámetros permiten evaluar el tiempo de retención, la producción de biogás y la energía eléctrica disponible para el generador de 10 kW_e.

Tabla III: Parámetros operacionales, producción de biogás y potencial eléctrico

Parámetro	Símbolo	Valor aprox.	Unidad
Volumen líquido de operación	V_L	49.0	m ³
Tiempo de retención hidráulico	TRH	22.8	d
Rendimiento específico de biogás	Y_{bg}	0.35	m ³ kg _{VS} ⁻¹
Producción diaria de biogás	Q_{bg}	42.8	m ³ d ⁻¹
Energía eléctrica diaria aprovechable	$E_{el,d}$	93.7	kWh d ⁻¹
Horas equivalentes de operación del generador de 10 kW _e	t_{op}	9.4	h d ⁻¹

El volumen líquido de operación de 49 m³, combinado con un caudal de alimentación de 2,15 m³/d, da un tiempo de

retención hidráulica de 22,8 días, suficiente para completar las etapas de hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis en un sistema mesofílico con purines de cerdo. Con la carga orgánica definida en la Tabla II, el rendimiento específico adoptado de 0,35 m³ de biogás por kg de VS indica un sustrato bien aprovechado y dentro del rango superior reportado para purines porcinos y codigestión con residuos orgánicos.

Bajo estas condiciones, el biodigestor produce en promedio 42,8 m³/d de biogás, lo que, considerando el poder calorífico del gas y una eficiencia eléctrica del 35 %, se traduce en 93,7 kWh/d de energía eléctrica aprovechable. Esto equivale a unas 9,4 h/d de operación continua de un generador de 10 kW, es decir, una franja diaria significativa de autoabastecimiento eléctrico para el parque porcino. En conjunto, los valores de la tabla confirman que el dimensionamiento hidráulico y la carga aplicada permiten un compromiso razonable entre estabilidad del proceso y producción energética.

Después de definir las dimensiones geométricas, en la Figura 1 se muestra el esquema de diseño del biodigestor de concreto de 70 m³. Se aprecia el reactor cilíndrico vertical de 4,25 m de diámetro interno y 5,0 m de altura, rematado por un domo semiesférico para el almacenamiento de biogás y construido con un muro de 0,25 m de espesor. La figura detalla además las cotas principales de enterramiento, los ductos de entrada de sustrato (4" y 6") con sus pendientes de 35–40° desde las cámaras de alimentación, el ducto de salida de digestato, así como la disposición de los agitadores internos, elementos clave para garantizar una adecuada mezcla hidráulica y el aprovechamiento del volumen útil del reactor.

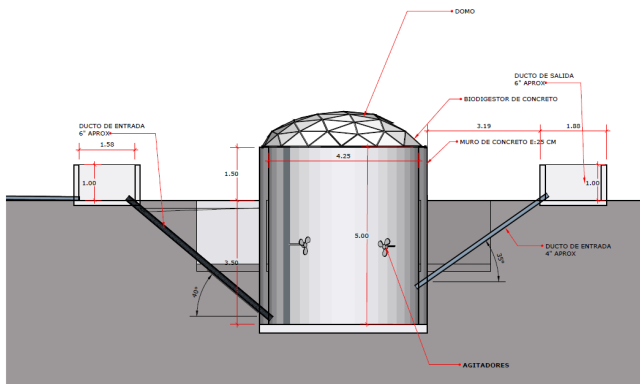


Figura 2: Vista seccional del biodigestor de concreto de 70 m³ con sistema de alimentación, agitación y almacenamiento de biogás.

En la Tabla 4 se resumen los parámetros financieros utilizados para evaluar la viabilidad económica del biodigestor de 70 m³ en Ventanilla. Los flujos de caja se expresan en dólares estadounidenses (USD) y corresponden a los ingresos netos anuales generados por la venta/ahorro de electricidad y el aprovechamiento del bioabono, una vez descontados los costos de operación y mantenimiento.

En la Tabla 5 se presentan los principales indicadores económicos obtenidos a partir de los flujos de caja calculados

Tabla IV: Parámetros económicos para la evaluación del proyecto

Parámetro	Símbolo	Valor aprox.	Unidad
Horizonte de evaluación	n	20	años
Inversión inicial total	I_0	34 440	USD
Flujo de caja neto año 1	FC_1	13 507	USD/año
Flujo de caja neto años 2–20 (prácticamente constante)	FC_{2-20}	13 660	USD/año
Tasa de descuento real	R	9	% anual
Margen de riesgo	m	5	% anual
Tasa de descuento real con margen	D	14	% anual

a partir de la Tabla 4. Los resultados muestran que el proyecto no solo recupera la inversión inicial en un plazo corto, sino que además genera un valor actual neto significativo a lo largo de los 20 años de operación considerados.

Tabla V: Indicadores de desempeño económico del proyecto

Indicador	Símbolo	Valor aprox.	Unidad
Valor actual de los flujos de caja (beneficios)	$\sum FD_t$	90 300	USD
Valor Actual Neto (tasa $D = 14\%$)	VAN	55 900	USD
Relación (VAN/I_0)	—	1.6	—
Tasa Interna de Retorno	TIR	22	% anual
Periodo de recuperación descontado	PRI	≈ 4	años

La figura 3 “VAN y PRI” muestra la evolución del flujo de caja descontado acumulado del proyecto del biodigestor de 70 m³ a lo largo de 21 años de operación. La curva azul representa el Valor Actual Neto acumulado (VAN), que parte de la inversión inicial negativa (aprox. –34 440 en el año 0) y va creciendo a medida que se generan los beneficios económicos anuales. El punto donde la curva cruza el eje horizontal (alrededor del año 4) indica el Periodo de Recuperación Descontado (PRI), es decir, el momento a partir del cual el proyecto comienza a generar beneficios netos positivos. La línea roja horizontal corresponde al VAN al final del horizonte de evaluación, cercano a 58 000, lo que confirma que, una vez recuperada la inversión, el proyecto continúa acumulando ganancias hasta más que duplicar el capital inicial invertido.

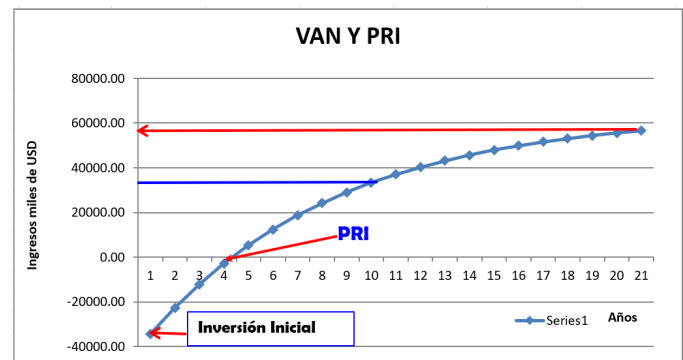


Figura 3: Vista completa del biodigestor terminado.

La figura 4 muestra la disposición en campo del sistema de manejo y valorización de residuos orgánicos en el Parque

Porcino de Ventanilla (Lima, Perú). En primer plano se observa el tanque de recepción de residuos, estructura cilíndrica de concreto donde se descargan inicialmente los purines porcinos y los residuos orgánicos frescos procedentes de las corrales y áreas de manejo. .



Figura 4: Vista completa del biodigestor terminado.

A continuación, en el centro de la imagen, se distingue el tanque rectangular de homogenización, en el que la mezcla se diluye y acondiciona antes de su envío al reactor principal. En el fondo de la escena se aprecia el biodigestor de concreto de 70 m³, que constituye el corazón del sistema de digestión anaeróbica y donde se produce el biogás y el digestato. El entorno árido periurbano refleja las condiciones reales del Parque Porcino de Ventanilla, subrayando que la infraestructura civil clave del sistema de biogás ya se encuentra implementada sobre el terreno, a la espera de la instalación de los equipos mecánicos y de control

IV. CONCLUSIONES

El biodigestor cilíndrico de concreto de 70 m³, con 49 m³ de volumen líquido de operación y 21 m³ destinados al almacenamiento de biogás (70/30 %), cumple con rangos de carga orgánica volumétrica (2.5 kgVS·m⁻³·d⁻¹) y tiempo de retención hidráulico (23 d) recomendados para purines porcinos en régimen mesofílico. Esto asegura estabilidad del proceso y un uso eficiente del volumen útil del reactor en condiciones reales del parque porcino de Ventanilla.

Bajo las hipótesis de diseño (413–420 cerdos, 0.35 m³ biogás·kg⁻¹ VS), el sistema alcanza una producción teórica de 43 m³/d de biogás, equivalente a 94–96 kWh/d de energía eléctrica aprovechable. Este potencial permite operar el generador de 10 kWe durante unas 9–10 h/d, cubriendo una fracción significativa de la demanda eléctrica del parque porcino y reduciendo el consumo de fuentes fósiles.

Con una inversión inicial del orden de 34 440 USD, los flujos de caja netos anuales asociados al ahorro/venta de electricidad y a la valorización parcial del biofertilizante generan

un VAN cercano a 55 900 USD ($D = 14\%$) una TIR del 22 % y un periodo de recuperación descontado de alrededor de 4 años. Estos indicadores muestran que, aun con supuestos conservadores, el proyecto es económicamente atractivo y consistente con los criterios de inversión para tecnologías de bioenergía descentralizada.

La construcción completa de la obra civil y la futura integración de sistemas de agitación, línea de biogás y grupo electrógeno consolidan este módulo como una plataforma demostrativa para parques porcinos periurbanos. El esquema propuesto ofrece una ruta replicable para transformar pasivos ambientales (purines y residuos orgánicos) en energía eléctrica y biofertilizante, contribuyendo a la mitigación de GEI y a la seguridad energética en explotaciones de pequeña y mediana escala; trabajos futuros deberán validar experimentalmente el desempeño a largo plazo y optimizar las condiciones operativas y de co-digestión.

V. ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Prociencia Peru for funding the project titled: “Design and implementation of a technological package for a biorefinery using pig manure and municipal organic matter for the production of biofertilizers, biogas, electricity, and biohydrogen for the Ventanilla community,” under Contract No. PE501091701-2024, which served as the foundation for the present study.

REFERENCIAS

- [1] Y. C. Alvarez, R. J. Borges, C. D. P. Vidal, F. M. C. Leon, J. S. P. Buendia, and J. A. S. Nolasco, “Design improvements and best practices in small-scale biodigesters for sustainable biogas production: A case study in the chillon valley, Perú,” *Energies*, vol. 18, no. 2, p. 338, 2025.
- [2] J. L. Paes, L. M. Costa, P. L. Fernandes, B. C. Vargas, and D. Cecchin, “Biogas production by anaerobic digestion of coffee husks and cattle manure,” *Engenharia Agrícola*, vol. 43, no. spe, p. e20220126, 2023.
- [3] Y. Castillo Alvarez, J. P. Monteagudo Yanes, R. Jiménez Borges, and C. D. Patiño Vidal, “Propuesta de diseño de un biodigestor industrial de cachaza para la generación de energía eléctrica,” *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 13, no. 5, pp. 74–80, 2021.
- [4] T. Kunatsa and X. Xia, “A review on anaerobic digestion with focus on the role of biomass co-digestion, modelling and optimisation on biogas production and enhancement,” *Bioresource technology*, vol. 344, p. 126311, 2022.
- [5] M. A. Koondhar, G. S. Kaloi, A. K. Junejo, A. H. Soomro, S. Chandio, and M. Ali, “The role of plc in automation, industry and education purpose: A review,” *Pakistan Journal of Engineering, Technology & Science*, vol. 11, no. 2, pp. 22–31, 2023.
- [6] M. S. Leite, S. L. de Lima Silva, T. C. R. L. Fernandes, S. K. da Silva, and A. C. B. de Araújo, “Optimization of domestic and industrial biodigestors based on machine learning techniques,” *Revista de Gestão Social e Ambiental*, vol. 17, no. 10, pp. 1–18, 2023.
- [7] Ministerio de Energía de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), and Global Environment Facility (GEF), *Manual de Biogás*, Proyecto CHI/00/G32, Ed. Santiago de Chile: FAO, 2011, preparación del manual: María Teresa Varnero Moreno.
- [8] M. Li, “Research on the application of plc technology in electrical automation engineering,” *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 615–624, 2023.
- [9] D. G. Camacho Alvarez, J. A. Chávez García, J. C. Lama Bustinza, B. Rodríguez Pérez, Y. Castillo Alvarez, and R. Jiménez Borges, “Improved biogas production by anaerobic co-digestion of whey and bovine manure: A case study in montevidео-peru,” in *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, Latin America, 2025.

- [10] I. R. C. Ante and W. P. P. Naranjo, "Estimación del potencial eléctrico de residuos orgánicos mediante el uso de biodigestores experimentales: Estimation of the electrical potential of organic waste through the use of experimental biodigesters," *Revista Científica Multidisciplinar Generando*, vol. 5, no. 1, pp. 101–128, 2024.
- [11] J. Jamison, S. K. Khanal, N. H. Nguyen, and J. L. Deenik, "Assessing the effects of digestates and combinations of digestates and fertilizer on yield and nutrient use of brassica juncea (kai choy)," *Agronomy*, vol. 11, no. 3, p. 509, 2021.
- [12] Y. Castillo Alvarez, J. J. Cordero Noa, G. V. Quispe Soto, and R. Jiménez Borges, "Efficiency and sustainability in industrial biogas plants: Bibliometric review of key operating parameters and emerging process metrics," *Sci*, vol. 8, no. 4, 2026. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2413-4155/8/4/71>
- [13] L. Mellouk, M. Ghazi, A. Aaroud, M. Boulmalf, D. Benhaddou, and K. Zine-Dine, "Design and energy management optimization for hybrid renewable energy system-case study: Laayoune region," *Renewable energy*, vol. 139, pp. 621–634, 2019.
- [14] N. Torres-Salado, P. Sánchez-Santillán, R. A. Rojas-García, I. Almaraz-Buendía, J. Herrera-Pérez, I. Reyes-Vázquez, and F. J. Mayren-Mendoza, "Producción de gas in vitro y características fermentativas de consorcios bacterianos celulolíticos ruminales de búfala de agua (bubalus bubalis) y vaca suiz-bu," *Agrociencia*, pp. 145–159, 2019.
- [15] R. G. S. Nogueira, F. Perna Junior, R. J. Tseu, and P. H. M. Rodrigues, "Dietary effects of cottonseed and vitamin e on greenhouse gas emissions from cattle feces analyzed in biodigesters," *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 58, p. e03037, 2023.
- [16] J. S. Pinares Buendía Álvarez, J. A. Samaniego Nolasco, C. D. Patiño Vidal, F. M. Carhuacho Leon, B. Rodríguez Pérez, R. Jiménez Borges, and Y. Castillo Alvarez, "Economic and environmental evaluation of a small-scale biogas plant: Case study in the chillón valley, peru," in *Proceedings of the Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI 2025)*. Latin America: LACCEI, 2025.
- [17] X. Zhao, J.-K. Hong, S. Y. Park, J. Yun, and E. H. Jho, "Stabilization of microbial network by co-digestion of swine manure and organic wastes," *Journal of Environmental Management*, vol. 355, p. 120475, 2024.
- [18] M. White, *PLCs for Beginners: An introductory guide to building robust PLC programs with Structured Text*. Packt Publishing Ltd, 2024.
- [19] M. Szyba and J. Mikulik, "Energy production from biodegradable waste as an example of the circular economy," *Energies*, vol. 15, no. 4, p. 1269, 2022.
- [20] J. P. Gómez Montoya, Y. Castillo Alvarez, R. Fernandes De Magalhães, and F. Henrique Lermen, "A thermo-economic analysis of a circular economy model for biomass in south america producing biofertilizers and biogas from municipal solid waste," *Renewable Energy*, vol. 225, p. 120254, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148124003197>
- [21] Y. Castillo Alvarez, R. Jiménez Borges, G. Alfonso-Francia, B. Rodríguez Pérez, C. D. Patiño Vidal, L. A. Iturralde Carrera, and J. Rodríguez-Reséndiz, "Transition to a circular bioeconomy in the sugar agro-industry: Predictive modeling to estimate the energy potential of by-products," *Technologies*, vol. 13, no. 6, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7080/13/6/238>
- [22] S. Sidi Habib, S. Torii, K. M. S., and A. Charivuparampil Achuthan Nair, "Optimization of the factors affecting biogas production using the taguchi design of experiment method," *Biomass*, vol. 4, no. 3, pp. 687–703, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2673-8783/4/3/38>
- [23] R. H. G. de Jesus, J. T. de Souza, F. N. Puglieri, C. M. Piekarski, and A. C. de Francisco, "Biodigester location problems, its economic-environmental-social aspects and techniques: Areas yet to be explored," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 3998–4008, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721004558>
- [24] M. Westerholm, T. Liu, and A. Schnürer, "Comparative study of industrial-scale high-solid biogas production from food waste: Process operation and microbiology," *Bioresour Technol*, vol. 304, p. 122981, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852420302509>
- [25] X. Gómez-Quiroga, K. Aboudi, C. J. Álvarez Gallego, and L. I. Romero-García, "Successful and stable operation of anaerobic thermophilic co-digestion of sun-dried sugar beet pulp and cow manure under short hydraulic retention time," *Chemosphere*, vol. 293, p. 133484, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521039588>
- [26] P. M. A. Arthur, Y. Konaté, B. Sawadogo, G. Sagoe, B. Dwumfour-Asare, I. Ahmed, R. Bayitse, and K. Ampomah-Benebo, "Evaluating the potential of renewable energy sources in a full-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor treating municipal wastewater in ghana," *Sustainability*, vol. 15, no. 4, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/3743>
- [27] Z. Wang, Y. Hu, S. Wang, G. Wu, and X. Zhan, "A critical review on dry anaerobic digestion of organic waste: Characteristics, operational conditions, and improvement strategies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 176, p. 113208, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123000643>
- [28] Z. Guo, M. Usman, S. A. Alsareii, F. A. Harraz, M. Al-Assiri, M. Jalalah, X. Li, and E.-S. Salama, "Synergistic ammonia and fatty acids inhibition of microbial communities during slaughterhouse waste digestion for biogas production," *Bioresour Technol*, vol. 337, p. 125383, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852421007239>
- [29] D. Elango, M. Pulikesi, P. Baskaralingam, V. Ramamurthi, and S. Sivanesan, "Production of biogas from municipal solid waste with domestic sewage," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 141, no. 1, pp. 301–304, 2007. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406007953>
- [30] N. Kalaiselvan, G. Glivin, A. Bakthavatsalam, V. Mariappan, M. Premalatha, P. S. Raveendran, S. Jayaraj, and S. J. Sekhar, "A waste to energy technology for enrichment of biomethane generation: A review on operating parameters, types of biodigesters, solar assisted heating systems, socio economic benefits and challenges," *Chemosphere*, vol. 293, p. 133486, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521039606>
- [31] T. Koo, A. Yulisa, and S. Hwang, "Microbial community structure in full scale anaerobic mono-and co-digesters treating food waste and animal waste," *Bioresour Technol*, vol. 282, pp. 439–446, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852419303992>
- [32] O. G. C. Novillo, "Desarrollo del proceso de producción de biogás y fertilizante orgánico a partir de mezclas de desechos de procesadoras de frutas," Ph.D. dissertation, UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO, 2010.
- [33] P. J. N. Ransoli, J. P. M. Yanes, and L. A. I. Carrera, "Anteproyecto de biodigestor de bolsa para la cocina comedor de la empresa porcina," *SciComm Report*, vol. 1, no. 2, pp. 1–16, 2021.
- [34] D. G. Camacho Alvarez, J. A. Chávez García, Y. Castillo Alvarez, and R. Jiménez Borges, "Sustainable valorization of bovine-guinea pig waste: Co-optimization of ph and ec in biodigesters," *Recycling*, vol. 10, no. 5, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2313-4321/10/5/190>
- [35] S. O'Connor, E. Ehimen, S. Pillai, A. Black, D. Tormey, and J. Bartlett, "Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on european farms," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 139, p. 110580, 2021.
- [36] S. A. Guares, J. D. de Lima, and G. A. Oliveira, "Techno-economic model to appraise the use of cattle manure in biodigesters in the generation of electrical energy and biofertilizer," *Biomass and Bioenergy*, vol. 150, p. 106107, 2021.