

# Chinese-type biodigester design using an automatic PLC-based control system in the Chillón Valley, Peru.

Elguera Belleza, Piero Joel<sup>1</sup>, Yoisdell Castillo Alvarez<sup>1\*</sup>, Reinier Jiménez Borges<sup>4</sup>, Berlan Rodríguez Pérez<sup>2</sup>,  
Carlos Diego Patiño Vidal<sup>1</sup>, Fanny Mabel Carhuanchon Leon<sup>3</sup>, Pfuyo Muñoz, Roberto<sup>5</sup>  
<sup>1</sup>Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú <sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú  
<sup>3</sup>Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú <sup>4</sup>Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba,  
<sup>5</sup> Department of Mechanical Electrical Engineering, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Lima 16, Perú.  
\*c19773@utp.edu.pe

## Abstract

**Abstract–** The research proposes improving the design of a Chinese-type biodigester located in the Chillón Valley by implementing an automatic control system based on PLC. The study starts from the current problem: these biodigesters require high human intervention, have little uniformity in the substrate mixture, and have variations in biogas production due to the lack of controlled agitation. Different types of biodigesters are analyzed, and the Chinese type is selected for its robustness and low cost. For the substrate of guinea pig manure mixed with water, properties such as density and viscosity are determined, which justify the need to install a mechanical agitation system. Based on these properties, the necessary motor power is calculated, determining that a 0.75 kW motor with a marine propeller is adequate to maintain a homogeneous mixture. The volume of biogas produced daily (2,495 m<sup>3</sup>/d) and its energy potential were also estimated, demonstrating that it can generate useful energy for self-consumption. Finally, an automated system was designed with a PLC, level sensors, contactors, gear motors, and electrical protections, allowing for the control of mixing times, levels, and motor operation without constant intervention. The study concludes that automation is technically and operationally viable, improving process efficiency, reducing human error, and increasing stability in biogas generation.

**Keywords–** Chinese-style biodigester, Automation, PLC, Biogas, Mechanical agitation.

# Diseño de biodigestor de tipo chino mediante un sistema de control automático basado en PLC en el Valle de Chillón, Perú

Elguera Belleza, Piero Joel<sup>1</sup>, Yoisdell Castillo Alvarez<sup>1\*</sup>, Reinier Jiménez Borges<sup>4</sup>, Berlan Rodríguez Pérez<sup>2</sup>,  
Carlos Diego Patiño Vidal<sup>1</sup>, Fanny Mabel Carhuacho Leon<sup>3</sup>, Pfuyo Muñoz, Roberto<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú <sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú

<sup>3</sup>Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú <sup>4</sup>Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba,

<sup>5</sup> Department of Mechanical Electrical Engineering, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Lima 16, Perú.

\*c19773@utp.edu.pe

**Resumen**—La investigación propone la mejora en el diseño de un biodigestor tipo chino ubicado en el Valle Chillón mediante la implementación de un sistema de control automático basado en PLC. El estudio parte del problema actual, estos biodigestores requieren alta intervención humana, presentan poca uniformidad en la mezcla del sustrato y tienen variaciones en la producción de biogás debido a la falta de agitación controlada. Se analizan distintos tipos de biodigestores y se selecciona el tipo chino por su robustez y bajo costo. Para el sustrato estiércol de cuy mezclado con agua, se determinan propiedades como densidad y viscosidad, las cuales justifican la necesidad de instalar un sistema de agitación mecánica. Con base en estas propiedades, se calcula la potencia necesaria del motor, determinándose que un motor de 0.75 kW con hélice marina es adecuado para mantener la mezcla homogénea. También se estimó el volumen de biogás producido diariamente (2.495 m<sup>3</sup>/d) y su potencial energético, demostrando que puede generar energía útil para autoconsumo. Finalmente, se diseña un sistema automatizado con PLC, sensores de nivel, contactores, motorreductores y protecciones eléctricas, lo que permite controlar tiempos de mezcla, niveles y funcionamiento del motor sin intervención constante. El estudio concluye que la automatización es viable técnica y operativamente, mejorando la eficiencia del proceso, reduciendo errores humanos y aumentando la estabilidad en la generación de biogás.

**Keywords**—Biodigestor tipo chino, Automatización, PLC, Biogás, Agitación mecánica.

## I. INTRODUCCION

El siglo XXI representa, de hecho, una era de transición económica, donde las actividades industriales típicas se ven amenazadas en la Bioeconomía Lineal basada en Combustibles Fósiles (BLCF) debido a la explotación descontrolada de los recursos naturales, lo que conlleva diversos problemas ecológicos, como la disminución de los combustibles fósiles y la emisión de niveles elevados y peligrosos de Gases de Efecto Invernadero (GEI) [1]. La acumulación de residuos biodegradables, resultado de las actividades humanas, constituye uno de los principales factores de impacto ambiental, ya que su inadecuada disposición puede ocasionar daños severos al entorno [2].

En este contexto, los biodigestores anaerobios surgen como una alternativa eficiente y sostenible, capaces de transformar

dichos desechos en biogás y biofertilizantes, promoviendo tanto la reducción de la contaminación como el aprovechamiento energético y agronómico de los residuos [3]. El biogás, mezcla de metano y dióxido de carbono generado en digestores, constituye una alternativa renovable derivada de la conversión anaerobia de sustratos orgánicos [4].

Los biodigestores, utilizados en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos, son reactores herméticos que operan en ausencia de oxígeno y permiten llevar a cabo la digestión anaeróbica. Para su diseño adecuado, resulta esencial determinar con precisión la cantidad de residuos a procesar, así como aplicar herramientas de modelamiento en 2D y 3D que faciliten la evaluación del espacio y las condiciones de operación [5]. Los biodigestores convierten los residuos orgánicos en biogás y biofertilizantes, reduciendo costos de energía y permitiendo su comercialización en el mercado de carbono. Aunque la biodigestión anaeróbica toma tiempo, el uso de inóculos acelera el proceso y mejora la eficiencia, produciendo biogás de alta calidad [6].

Los biodigestores en la industria avícola representan una alternativa viable para la producción de energía limpia y la valorización de residuos, alineándose con los objetivos de sostenibilidad ambiental y económica [7]. Una granja productiva más eficiente tiende a incluir acciones ambientalmente sostenibles, ya que la cría de cerdos se considera una actividad relevante en materia ambiental debido a la cantidad de estiércol producido, especialmente en un sistema intensivo. En este contexto, varios estudios actuales han debatido la reutilización ambientalmente correcta del estiércol de cerdo [8] [9].

La digestión anaeróbica de estiércol genera metano, un potente gas de efecto invernadero, representando el 10 % de las emisiones globales de CH<sub>4</sub> en 2020. La co-digestión de estiércol porcino con residuos alimentarios (6:4) produjo 72,87 ml de CH<sub>4</sub> por gramo de Sólidos Volátiles (SV), y aumentar la presión en el digestor mejora la producción de metano. Además, la co-digestión con residuos sólidos urbanos optimiza la eficiencia del proceso [10]–[12].

La co-digestión de estiércol bovino y cáscara de café mejora la producción de biogás y la calidad del digestato. Los modelos

matemáticos optimizan el proceso, favoreciendo la generación de energía limpia y contribuyendo a la economía circular [6], [13]. La adición de consorcios bacterianos celulolíticos en biodigestores aumentó la producción acumulada de gas y metano a las 72 horas ( $p \leq 0,05$ ), además de mejorar la degradación de la materia seca y la fibra detergente neutro [14].

La ganadería ocupa el 80 % de la superficie agrícola y contribuye con el 26,6 % al Producto Interno Bruto (PIB) agroindustrial de Brasil. Se proyecta un aumento del 16,2 % en la producción de ganado para 2029/30. Los biodigestores reducen costos de energía en un 60 % y ahorran hasta reales brasileños (R\$) 146.000 anuales en fertilizantes, además de permitir la autosuficiencia energética en fincas rurales [15], [16] [17].

En los países en desarrollo, la Digestión Anaeróbica (DA) es clave tanto para gestionar residuos como para generar energía, especialmente en áreas rurales remotas. En Colombia, por ejemplo, hasta un 28 % de la matriz energética podría provenir de residuos agrícolas y ganaderos. Los biodigestores domésticos, de bajo costo y fácil manejo, son comunes en la región, con modelos como los digestores tubulares que operan a diferentes temperaturas. En Colombia, donde el 66 % del territorio no tiene acceso a electricidad del Sistema Interconectado Nacional, la DA se considera una solución limpia y sostenible para la generación de biogás, mejorando la calidad de vida en comunidades rurales y contribuyendo a la autosuficiencia energética [18], [19].

Los digestores de bajo costo en América Latina producen entre 0,15–0,4 m<sup>3</sup> de biogás/kg SV en condiciones mesófilas, con metano al 62,6 %. En regiones frías, la producción disminuye a 0,03–0,44 m<sup>3</sup>/kg SV/día. El uso de microorganismos adaptados y calefacción solar puede mejorar el rendimiento. Estos sistemas ofrecen beneficios como ahorros de \$ 600 anuales en energía y fertilizantes, aunque tras años de operación pueden surgir problemas operativos como obstrucciones [20]–[22] [23].

En África subsahariana, la gestión del estiércol porcino sin tratamiento genera impactos ambientales negativos. Un estudio en Yaundé evaluó un digestor tubular de bajo costo (2 m<sup>3</sup>, carga orgánica de 3,945 kg SV/m<sup>3</sup>) durante tres meses, observando una producción de biogás de 0,1 a 0,4 m<sup>3</sup>/kg de SV/día. Se registraron reducciones del 82 % en sólidos volátiles, 88 % en demanda química de oxígeno y 83 % en demanda bioquímica de oxígeno. Además, hubo disminución en la mayoría de patógenos, como *Escherichia coli*, aunque otros no se vieron afectados [24]–[26].

En la actualidad, los biodigestores convencionales de tipo chino, utilizados en el proceso de gases y de fertilizantes orgánicos, presentan un diseño deficiente, el cual requiere de un gran porcentaje de intervención humana. En esta investigación se estudiará un biodigestor de capacidad 13,87 m<sup>3</sup> tipo chino ubicado en el Valle Chillón, con el propósito de implementar mejoras al diseño y poder lograr un proceso automatizado.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

El Valle Chillón, ubicado al norte de Lima, Perú, es una de las principales zonas agrícolas de la región capital. Formado por el río Chillón, este valle ha sido habitado desde épocas prehispánicas y alberga importantes restos arqueológicos. Actualmente, combina actividades agrícolas, turísticas y urbanas, aunque enfrenta desafíos por el crecimiento poblacional y la reducción de sus áreas de cultivo. Su relevancia radica en el equilibrio entre el desarrollo urbano y la preservación de su patrimonio natural y cultural.



Figura 1: Ubicación del biodigestor en el Valle Chillón [27].

### II-A. Diagrama de flujo de tratamiento de residuos

La Figura 2 muestra un diagrama de flujo que representa el proceso de tratamiento de residuos orgánicos para la producción de fertilizantes y biogás en el Valle del Chillón, ubicado a  $-11,87^\circ$  N y  $-70,06^\circ$  O, Perú [27].

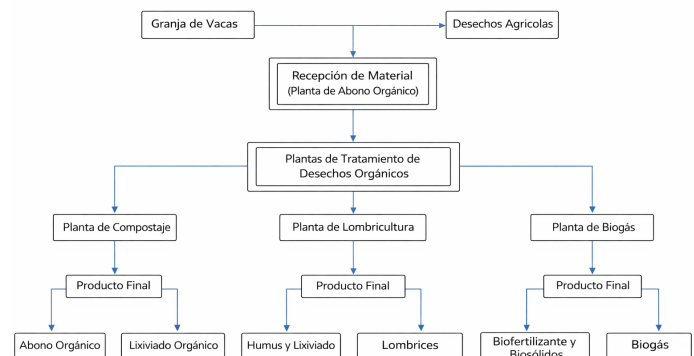


Figura 2: Diagrama de flujo para el tratamiento de residuos orgánicos en la producción de fertilizantes y biogás [27].

### II-B. Dimensionamiento del biodigestor

#### II-B1. 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 [11].

- **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 [28].
- **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) [29].
- **Biodigestores prefabricados de fibra de vidrio o plástico reforzado:** poseen mayor durabilidad y facilidad de instalación, aunque su costo es significativamente mayor [30].

*II-B2. Dimensiones del biodigestor y volumen:* El volumen del biodigestor se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$V = l \times a \times h \quad (1)$$

donde:  $l$  = Largo,  $a$  = Ancho,  $h$  = Alto.

*II-C. Propiedades del sustrato*

En este caso, el sustrato estará compuesto por estiércol de cuy y materia orgánica, sumado al agua.

*II-C1. Densidad de la materia:* La densidad del material se determina mediante la siguiente ecuación [18]:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$$

donde:  $\rho$  = Densidad ( $\text{kg/m}^3$ ),  $m$  = Masa del objeto (kg),  $v$  = Volumen que ocupa el objeto ( $\text{m}^3$ ).

*II-C2. Viscosidad de la materia:* La viscosidad cinemática se obtiene a partir de la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad, según la ecuación [18]:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

donde:  $\nu$  = Viscosidad cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $\mu$  = Viscosidad dinámica ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ),  $\rho$  = Densidad ( $\text{kg/m}^3$ ).

*II-D. Cálculos de los agitadores*

Los agitadores son dispositivos mecánicos diseñados para mezclar o mantener homogéneas las sustancias dentro de un tanque o reactor. Su función principal es favorecer la transferencia de masa y energía, evitar la sedimentación de sólidos y mejorar los procesos biológicos, químicos o térmicos que ocurren en el sistema.

El tipo de agitador se selecciona en función de las características del fluido, el objetivo de la mezcla y el diseño del recipiente [31], [32].

*II-D1. Hélice marina:* La Figura 3 muestra un ejemplo de hélice marina empleada en sistemas de agitación para biodigestores.



Figura 3: Hélice marina utilizada en el sistema de mezcla del biodigestor.

*II-E. Determinación del número de motores necesarios*

La generación de electricidad del motogenerador seleccionado en un día se determina mediante la siguiente ecuación [18], [29]:

$$P_t = P_{nm} \times N_{h/día} \quad (4)$$

donde:  $P_t$  = Potencia total generada en un día ( $\text{kWh/d}$ ),  $P_{nm}$  = Potencia nominal del motor ( $\text{kW}$ ),  $N_{h/día}$  = Número de horas que hay en un día ( $\text{h/d}$ ).

*II-F. Cálculo de potencia para estimar la potencia del agitador*

La potencia necesaria para el agitador se determinará mediante la siguiente ecuación [32]:

$$P = N_p \times \rho \times N^3 \times D^5 \quad (5)$$

donde:  $P$  = Potencia en el eje ( $\text{W}$ ),  $N_p$  = Número de potencia (adimensional, depende del tipo de paleta/impulsor y del régimen de operación),  $\rho$  = Densidad ( $\text{kg/m}^3$ ),  $N$  = Velocidad de rotación ( $\text{rev/s}$ ),  $D$  = Diámetro del impulsor ( $\text{m}$ ).

*II-G. Cálculo del volumen de biogás generado*

El volumen total de biogás generado se determina mediante la siguiente ecuación [18]:

$$V_{tb} = Y \times M \quad (6)$$

donde:  $V_{tb}$  = Volumen de biogás generado ( $\text{Nm}^3/\text{d}$ ),  $Y$  = Rendimiento del sustrato ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ),  $M$  = Masa del sustrato ( $\text{kg}$ ).

## II-H. Determinación del consumo de biogás por el motogenerador

El consumo de biogás del motogenerador se determina empleando la ecuación [18], [29]:

$$C_{bm} = P_t \times C_{dtf} \quad (7)$$

donde:  $C_{bm}$  = Consumo de biogás por un motor en un día ( $\text{Nm}^3/\text{d}$ ),  $P_t$  = Potencia total generada en un día ( $\text{kWh}/\text{d}$ ),  $C_{dtf}$  = Consumo del fabricante para generar energía ( $\text{m}^3/\text{kWh}$ ).

## II-I. Control Lógico Programable (PLC)

El *Programable Lógico Controlador* (PLC) es un dispositivo electrónico digital diseñado para automatizar procesos electromecánicos mediante la ejecución de instrucciones lógicas programadas. Este equipo recibe señales de entrada provenientes de sensores o interruptores, las procesa de acuerdo con un programa interno y genera salidas que controlan actuadores como motores, válvulas o contactores [33], [34].

Esto significa que un PLC puede ejecutar funciones como temporizado, conteo, lógica booleana y operaciones aritméticas, integrando en un solo equipo capacidades que antes requerían varios relés y temporizadores [33], [34]. Los PLC se han convertido en el corazón de los sistemas de automatización modernos, ya que permiten una programación sencilla y flexible, adaptándose a diferentes procesos industriales.

Entre las funciones más comunes de un PLC se incluyen:

- Procesamiento de señales digitales y analógicas, permitiendo la lectura de sensores y la activación de actuadores.
- Ejecución de temporizadores y contadores, utilizados para controlar secuencias cíclicas o repetitivas (por ejemplo, encender un motor cada cierto tiempo).
- Control lógico, mediante instrucciones tipo “si-entonces” que definen las condiciones de operación.
- Monitoreo y diagnóstico, brindando información en tiempo real sobre el estado del sistema.

Los PLC se utilizan ampliamente en la automatización industrial debido a su fiabilidad, robustez y facilidad de mantenimiento. Gracias a su diseño modular, permiten modificaciones o expansiones sin necesidad de reemplazar el sistema completo, lo que los convierte en una solución eficiente para controlar procesos en fábricas, plantas de tratamiento o biodigestores [35], [36].

## III. RESULTADOS

Este trabajo estudia la posibilidad de implementar una planta de biogás tipo chino de baja escala en el Valle Chillón, evaluando tanto su desempeño en la generación de energía como su contribución a la reducción de emisiones y su conveniencia económica frente a combustibles tradicionales como el Gas Licuado de Petróleo (GLP) y la leña, para causar un menor impacto ambiental por contaminación o uso de energías fósiles o derivadas.

En los biodigestores anaerobios de pequeña y mediana escala, el comportamiento reológico del sustrato constituye un

criterio determinante para la selección y el dimensionamiento del sistema de agitación. Propiedades como la densidad y, especialmente, la viscosidad del estiércol y de sus mezclas con agua influyen directamente en la distribución de sólidos, la transferencia de masa y la estabilidad del proceso de digestión anaeróbica. En el caso del estiércol de cuy, su elevado contenido de sólidos genera mezclas con viscosidades significativamente superiores a las del agua, lo que incrementa la resistencia al flujo y favorece fenómenos de sedimentación y estratificación dentro del reactor.

Bajo estas condiciones, la operación de biodigestores tipo chino sin agitación controlada puede derivar en zonas muertas, disminución de la eficiencia biológica y variaciones en la producción de biogás. Por ello, la caracterización física del sustrato y de las relaciones excremento-agua empleadas resulta esencial para justificar la incorporación de un sistema de agitación mecánica. En este estudio, los valores de densidad y viscosidad obtenidos para diferentes proporciones de mezcla sirven como base técnica para la selección de un agitador tipo hélice marina, capaz de proporcionar una mezcla homogénea con un consumo energético moderado, adecuado para biodigestores de baja escala y sustratos de comportamiento viscoso se muestran en la tabla.

| Material / Mezcla      | Estado / Proporción  | Densidad ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | Viscosidad (Pa·s)     | dinámica |
|------------------------|----------------------|--------------------------------------------|-----------------------|----------|
| Estiércol de cuy       | Fresco               | 1050 – 1100                                | 0.5 – 3.0             |          |
| Agua                   | Temperatura ambiente | 1000                                       | $0.89 \times 10^{-3}$ |          |
| Mezcla excremento-agua | 1:3                  | 1025                                       | 0.05 – 0.15           |          |
| Mezcla excremento-agua | 1:2.5                | 1040                                       | 0.10 – 0.30           |          |
| Mezcla excremento-agua | 1:2                  | 1050                                       | 0.30 – 0.80           |          |

La tabla evidencia que la mezcla excremento-agua utilizada presenta densidades superiores a  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y viscosidades significativamente mayores que las del agua, lo que define un medio de comportamiento hidrodinámico complejo. Estas propiedades favorecen la sedimentación de sólidos y la formación de gradientes espaciales cuando no existe mezcla forzada. En la relación 1:2.5, los valores de viscosidad indican una resistencia al flujo suficiente para limitar la homogenización natural del sustrato. Bajo estas condiciones, la agitación se convierte en un elemento estructural del diseño del biodigestor y no en un componente accesorio.

El biodigestor tipo chino presenta un ancho de 2.92 m, un largo de 2.46 m y una altura de 1.93 m, lo que corresponde a un volumen total de  $13.86 \text{ m}^3$ . Estas dimensiones permiten un adecuado alojamiento del sustrato y del volumen de gas generado, siendo consistentes con los criterios de diseño para biodigestores de pequeña a mediana escala utilizados en aplicaciones agropecuarias.

Tabla I: Parámetros de diseño y desempeño del sistema de producción de biogás

| Categoría                  | Parámetro                              | Símbolo  | Valor          | Unidad                           |
|----------------------------|----------------------------------------|----------|----------------|----------------------------------|
| Alimentación               | Masa diaria de sustrato (estiércol)    | $M$      | 100            | $\text{kg}\cdot\text{día}^{-1}$  |
|                            | Relación agua:sustrato                 | –        | 2.5:1          |                                  |
|                            | Masa diaria de agua                    | –        | 250            | $\text{kg}\cdot\text{día}^{-1}$  |
| Propiedades de la mezcla   | Densidad de la mezcla                  | $\rho$   | 1000           | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$    |
| Parámetros hidráulicos     | Caudal diario de alimentación          | $Q$      | 0.35           | $\text{m}^3\cdot\text{día}^{-1}$ |
|                            | Tiempo de retención hidráulica         | HRT      | 30             | días                             |
| Dimensionamiento           | Volumen de digestión                   | $V_d$    | 10.5           | $\text{m}^3$                     |
|                            | Factor de sobrevolumen                 | –        | 1.30           |                                  |
|                            | Volumen de construcción del digestor   | $V_{cd}$ | 13.65          | $\text{m}^3$                     |
|                            | Rendimiento específico de biogás       | $Y'$     | 0.057          | $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$  |
| Producción de biogás       | Producción diaria de biogás            | $V_{cb}$ | 5.7            | $\text{m}^3\cdot\text{día}^{-1}$ |
|                            | Poder calorífico inferior del biogás   | PCI      | 6              | $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$   |
| Aprovechamiento energético | Energía térmica disponible             | –        | 34.2           | $\text{kWh}\cdot\text{día}^{-1}$ |
|                            | Eficiencia eléctrica del motogenerador | $\eta_e$ | 30             | %                                |
|                            | Energía eléctrica generable            | –        | $\approx 10.3$ | $\text{kWh}\cdot\text{día}^{-1}$ |
|                            |                                        |          |                |                                  |



### III-A. Potencia del motor para el agitador

La Tabla III presenta las principales características eléctricas y mecánicas del motor seleccionado para el sistema de agitación del biodigestor, las cuales son determinantes para garantizar una operación estable y continua bajo condiciones de alta viscosidad del sustrato. Los parámetros de potencia, par, eficiencia y régimen de arranque permiten evaluar la capacidad del motor para vencer la resistencia hidráulica de la mezcla excremento-agua y asegurar una agitación adecuada, condición clave para evitar sedimentación, mejorar la homogeneidad del sustrato y favorecer la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica. La potencia requerida es de 0.75 kW, con una velocidad entre 1390 y 1670 rpm.

Tabla II: Características del motor eléctrico

| Datos del motor                  | Valor / Observación                              |
|----------------------------------|--------------------------------------------------|
| Potencia nominal                 | 0.75 kW                                          |
| Velocidad nominal                | 1390–1670 min <sup>-1</sup> (50 Hz)              |
| Frecuencia nominal               | 50 Hz                                            |
| Tensión nominal                  | 230 V ( $\Delta$ /50Hz), 400 V (Y/50Hz)          |
| Par nominal                      | 5.16 Nm                                          |
| Corriente nominal                | 3.21 A ( $V/\Delta$ /50Hz), 1.86 A ( $VY$ /50Hz) |
| Corriente de arranque            | $6 \times I_n$                                   |
| Par de arranque                  | $2.2 \times M_n$                                 |
| Par de ruptura                   | $2.4 \times M_n$                                 |
| Clase de eficiencia              | IE1                                              |
| Eficiencia (50 Hz)               | 74.4 % @100 % carga, 73.9 % @50 % carga          |
| Factor de potencia (cos $\phi$ ) | 0.79                                             |

El sistema de agitación se configura mediante un motor eléctrico principal de 0.75 kW ubicado en la línea de entrada del sustrato, cuya función es asegurar la homogeneización inicial de la mezcla excremento-agua durante la alimentación del biodigestor. Adicionalmente, se incorporan dos motorreductores internos, acoplados a los agitadores, que permiten transmitir alto par a bajas velocidades de rotación, condición esencial para el manejo de un sustrato con elevada densidad y viscosidad aparente. Esta disposición combinada garantiza una mezcla axial y radial eficiente dentro del reactor, minimizando fenómenos de sedimentación, flotación y estratificación, sin incrementar innecesariamente la potencia instalada. En consecuencia, la selección de un motor de agitación en la entrada y motorreductores internos responde a criterios de estabilidad hidrodinámica, eficiencia energética y confiabilidad operativa del biodigestor tipo chino.

### III-B. Arquitectura de automatización y control del biodigestor mediante PLC

La Tabla IV presenta los componentes principales requeridos para la implementación del sistema de automatización del biodigestor, basado en un Controlador Lógico Programable (PLC). La selección de estos elementos responde a la necesidad de garantizar un control confiable y seguro de las variables operativas críticas del sistema, tales como los niveles del sustrato, los ciclos de agitación y el accionamiento del motor, minimizando la intervención manual. El uso de sensores de nivel, contactores, protecciones eléctricas y temporización programada permite operar el sistema de forma cíclica y estable, asegurando la correcta mezcla del sustrato y

protegiendo los equipos electromecánicos frente a sobrecargas. En conjunto, esta configuración proporciona una arquitectura de control robusta, escalable y adecuada para biodigestores de pequeña y mediana escala, alineada con criterios de seguridad industrial y operación continua.

Tabla III: Materiales para implementación del sistema PLC

| Elemento                             | Función principal                           | Ejemplo / Especificaciones                                        |
|--------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| PLC (Controlador Lógico Programable) | Control de entradas/salidas y temporización | Siemens LOGO!, Delta DVP14SS2, MicroLogix 1000                    |
| Fuente de alimentación (24 VDC)      | Alimentar PLC y sensores                    | 24 V DC, 5 A                                                      |
| Contacto magnético                   | Conmutar el motor mediante señales del PLC  | 3p, 220 V AC, 9–12 A                                              |
| Relé intermedio                      | Aislar salidas del PLC                      | 24 V DC, 10 A                                                     |
| Motor eléctrico                      | Accionar hélices del sistema                | 0.5–1 HP, 220 V AC                                                |
| Sensor de nivel de agua              | Detectar nivel del fluido                   | Ultrasónico JSN-SR04T o tipo boya                                 |
| Temporizador interno (PLC)           | Ciclo de encendido/apagado                  | Programado en ladder (TIMER ON/OFF)                               |
| Protector térmico / Guardamotor      | Protección ante sobrecargas                 | Schneider GV2-ME14 o similar                                      |
| Interruptor general / Disyuntor      | Protección general                          | Breaker 10–16 A, 2p                                               |
| Botonera de control manual           | Control local del sistema                   | Pulsadores Start/Stop con luz piloto                              |
| Cables de control y potencia         | Conexión entre elementos                    | THHN 2.5 mm <sup>2</sup> (potencia) y 1 mm <sup>2</sup> (control) |
| Gabinete eléctrico                   | Protección y montaje                        | Caja metálica IP54 con riel DIN                                   |
| Programador o software PLC           | Programar secuencia de control              | TIA Portal, WPLSoft o RSLogix                                     |
| Bornes y canalas                     | Organización del cableado                   | Bornes WAGO o Phoenix Contact                                     |
| Indicadores LED / HMI simple         | Monitoreo del sistema                       | LED verde (ON), rojo (OFF) o mini HMI                             |

La Tabla IV y la Figura 4 describen la configuración del sistema de automatización basado en PLC implementado en el biodigestor tipo chino, el cual integra elementos de control, protección y monitoreo para garantizar una operación estable y segura del proceso. La selección de sensores de nivel, contactores, protecciones térmicas y temporización programable permite controlar de forma precisa los ciclos de agitación y el funcionamiento de los motores, reduciendo la intervención humana y minimizando errores operativos. El plano eléctrico presentado en la Figura 4 evidencia la correcta interconexión entre potencia y control, asegurando la protección de los equipos y la confiabilidad del sistema, lo que contribuye directamente a mantener condiciones hidráulicas y mecánicas adecuadas para una digestión anaeróbica eficiente y una producción de biogás más estable.

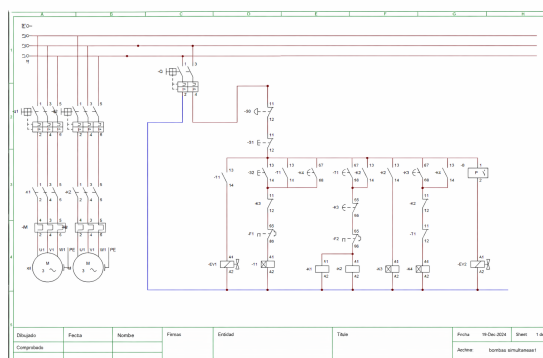


Figura 4: Plano eléctrico de instalación del PLC.

La Figura 5 presenta la vista superior del biodigestor tipo chino con el sistema de agitación instalado, donde se aprecia la disposición espacial de los agitadores en relación con el

volumen del reactor. Esta configuración integra un agitador en la zona de entrada para favorecer la homogenización inicial del sustrato y dos motoreductores internos encargados de mantener una mezcla uniforme durante la digestión anaerobia, reduciendo gradientes de concentración, evitando sedimentación de sólidos y mejorando la estabilidad hidráulica y biológica del proceso.

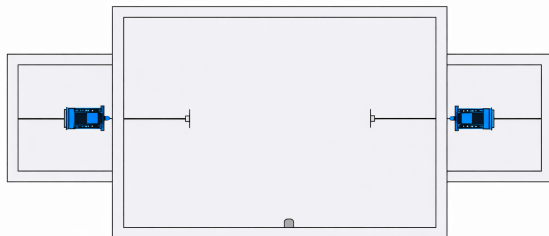


Figura 5: Vista superior del biodigestor con los agitadores instalados.

La Figura 6 presenta la vista completa del biodigestor tipo chino una vez incorporadas las mejoras de diseño y los sistemas auxiliares, permitiendo apreciar de manera integrada la configuración estructural del reactor principal, las cámaras de entrada y salida, y los puntos de conexión del sistema de agitación y control. Esta representación tridimensional facilita la comprensión espacial del sistema, evidenciando cómo las modificaciones propuestas se adaptan a la geometría original del biodigestor sin alterar su estructura básica, y garantizan una operación más eficiente, controlada y funcional para la producción estable de biogás.



Figura 6: Vista completa del biodigestor tipo chino terminado.

La imagen muestra configuración final del biodigestor tipo chino con un volumen útil de  $13,86 \text{ m}^3$ , diseñado para operar con una carga diaria de  $100 \text{ kg}$  de estiércol de cuy diluido

en una relación excremento:agua de  $1:2,5$ , lo que garantiza una densidad de mezcla cercana a  $1040 \text{ kg/m}^3$  y una viscosidad cinemática del orden de  $10 \text{ m}^2/\text{s}$ . Esta disposición geométrica permite alojar el sistema de agitación mecánica dimensionado con un motor de  $0,75 \text{ kW}$ , capaz de vencer las resistencias reológicas del sustrato y mantener condiciones homogéneas durante el tiempo de retención hidráulica de  $30$  días. La integración de las cámaras de entrada y salida favorece un flujo continuo y estable, coherente con una producción estimada de  $2,495 \text{ m}^3$  de biogás por día, valor consistente con un rendimiento específico de  $0,057 \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ . En conjunto, el diseño final evidencia una adaptación funcional del biodigestor tradicional que mejora la estabilidad hidráulica, la eficiencia de mezcla y la confiabilidad operativa del sistema sin alterar su principio constructivo original.

#### IV. CONCLUSIONES

- El estudio demuestra que un biodigestor tipo chino existente de  $13,86 \text{ m}^3$  puede ser significativamente mejorado sin modificar su estructura civil, mediante la incorporación de un sistema de agitación mecánica y automatización, lo que incrementa la eficiencia operativa y la estabilidad del proceso de digestión anaeróbica.
- La caracterización reológica del sustrato (estiércol de cuy), con densidades entre  $1050\text{--}1100 \text{ kg/m}^3$  y viscosidades dinámicas de hasta  $3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , permitió justificar técnicamente la necesidad de un sistema de mezcla, estableciendo una relación directa entre propiedades físicas del sustrato y decisiones de diseño mecánico.
- El dimensionamiento del sistema de agitación, basado en criterios clásicos de potencia de mezclado, confirmó que un motor eléctrico de  $0,75 \text{ kW}$  con hélice marina es adecuado para mantener la homogeneidad del sustrato, evitando sedimentación y favoreciendo una digestión más eficiente, el control automático mediante PLC permitió regular ciclos de mezcla, niveles y protección del motor, reduciendo la intervención humana y aumentando la confiabilidad del sistema, lo que representa un avance relevante frente a la operación manual tradicional de este tipo de biodigestores.
- La propuesta resulta técnica y operativamente viable, cumpliendo criterios de seguridad industrial y aportando a una mayor producción y estabilidad del biogás.

#### V. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Tecnológica del Perú por el financiamiento del Proyecto P-2024-LIM-20 “Mejora de la eficiencia en la producción de biogás mediante el diseño optimizado de los biodigestores tipo chino: Caso de estudio digestor de  $20 \text{ m}^3$  en el Valle Chillón”.

#### REFERENCIAS

- [1] P. K. Sarangi, A. K. Singh, S. Sonkar, K. P. Shadangi, R. K. Srivastava, V. K. Gupta, J. Parikh, U. K. Sahoo, and M. Govarthanan, “Biorefinery solutions for food processing wastes: A sustainable bioeconomic perspective,” *Industrial Crops and Products*, vol. 205, p. 117488, 2023.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] G. I. L. Fernández, F. A. C. Alva *et al.*, "Design of discontinuous biodigesters for the production of biofertilizers from organic solid waste from the casa grande district market, la libertad region, 2021 diseño de biodigestores discontinuos para la producción de biofertilizantes a partir de residuos sólidos orgánicos."
- [6] 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.
- [7] S. V. Souza, R. M. T. Gimenes, A. C. A. Orrico, M. G. de Almeida, and O. J. Sabbag, "Desenvolvimento da sustentabilidade avícola a partir do uso de biodigestores," *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, vol. 15, no. 1, pp. 237–254, 2022.
- [8] 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.
- [9] 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>
- [10] 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.
- [11] 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.
- [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] 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.
- [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] 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.
- [16] —, "Corrigendum to "techno-economic model to appraise the use of cattle manure in biodigesters in the generation of electrical energy and biofertilizer"[biomass bioenergy 150 (2021) 1–11]," *Biomass and Bioenergy*, vol. 179, p. 106970, 2023.
- [17] 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 montevideo-peru," in *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, Latin America, 2025.
- [18] 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.
- [19] C. Tavera-Ruiz, J. Martí-Herrero, O. Mendieta, J. Jaimes-Estévez, P. Gauthier-Maradei, U. Azimov, H. Escalante, and L. Castro, "Current understanding and perspectives on anaerobic digestion in developing countries: Colombia case study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 173, p. 113097, 2023.
- [20] P. G. McAteer, A. C. Trego, C. Thorn, T. Mahony, F. Abram, and V. O'flaherty, "Reactor configuration influences microbial community structure during high-rate, low-temperature anaerobic treatment of dairy wastewater," *Bioresource Technology*, vol. 307, p. 123221, 2020.
- [21] J.-H. Park, J.-H. Park, S.-H. Lee, S. P. Jung, and S.-H. Kim, "Enhancing anaerobic digestion for rural wastewater treatment with granular activated carbon (gac) supplementation," *Bioresource technology*, vol. 315, p. 123890, 2020.
- [22] J. Jaimes-Estévez, G. Zafra, J. Martí-Herrero, G. Pelaz, A. Morán, A. Puentes, C. Gomez, L. d. P. Castro, and H. Escalante Hernandez, "Psychrophilic full scale tubular digester operating over eight years: complete performance evaluation and microbiological population," *Energies*, vol. 14, no. 1, p. 151, 2020.
- [23] J. S. Pinares Buendía Álvarez, J. A. Samaniego Nolasco, C. D. Patiño Vidal, F. M. Carhuancho 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] C. A. Fouedjio, G. V. Djumyong Wafo, A. Ayo, I. U. Jeuke Ngougni, M. Nounja Zuitchou, J. J. Nana Ndongang, P. Atabong Agendia, and I. M. Kengne Nomsu, "Assessment of operational efficiency of a low-cost tubular digester for pig manure in the urban areas of yaoundé," *Waste and Biomass Valorization*, pp. 1–14, 2025.
- [27] 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, peru," *Energies*, vol. 18, no. 2, p. 338, 2025.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] J. Lindmark, E. Thorin, R. B. Fdhila, and E. Dahlquist, "Effects of mixing on the result of anaerobic digestion," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 1030–1047, 2014.
- [32] B. Singh, K. L. Kovács, Z. Bagi, J. Nyári, G. L. Szepesi, M. Petrik, Z. Siménfalvi, and Z. Szamosi, "Enhancing efficiency of anaerobic digestion by optimization of mixing regimes using helical ribbon impeller," *Fermentation*, vol. 7, no. 4, p. 251, 2021.
- [33] R. Patel and P. Patel, "A survey on ai-driven autonomous robots for smart manufacturing and industrial automation."
- [34] M. White, *PLCs for Beginners: An introductory guide to building robust PLC programs with Structured Text*. Packt Publishing Ltd, 2024.
- [35] 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.
- [36] 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.