

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE UN
CENTRO DE FAENADO AVÍCOLA PARA LA GENERACIÓN DE
ENERGÍA**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL**

AUTOR

KAROLINE STEFANY SANTACRUZ SÁNCHEZ

ASESOR

DIANA PECHE CIEZA

<https://orcid.org/0000-0002-1787-9758>

Chiclayo, 2021

**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE UN
CENTRO DE FAENADO AVÍCOLA PARA LA GENERACIÓN
DE ENERGÍA**

PRESENTADA POR:

KAROLINE STEFANY SANTACRUZ SÁNCHEZ

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo

para optar el título de

INGENIERO INDUSTRIAL

APROBADA POR:

Annie Mariella Vidarte Llaja

PRESIDENTE

Anabelle Edith Zegarra Gonzales

SECRETARIO

Diana Peche Cieza

VOCAL

Índice

Resumen	4
Abstract	5
Introducción	6
Revisión de la literatura.....	6
Materiales y métodos	8
Resultados y discusión	10
Conclusiones	21
Recomendaciones.....	21
Referencias	22
Anexos.....	26

Resumen

La presente investigación se centra en la propuesta de un sistema de generación de biogás a partir de residuos de un centro de faenado avícola para su aprovechamiento en energía, con ello se pretende cubrir un porcentaje del consumo de energía en el centro y también reducir el factor contaminante que genera la falta de manejo de estos residuos. Inicialmente se determinó mediante fuentes secundarias los parámetros físico químicos de los residuos (0,511 m³/día) como materia seca (76%), relación C/N (5-8), sólidos orgánicos (17%), sólidos volátiles (superior a 60%) y proteínas (91%). Además, se evaluó al biodigestor tipo chino como la opción más viable a instalar, pues al realizar el método de factores ponderados este resaltó en cuanto a la facilidad de mantenimiento, eficiencia de producción de biogás, vida útil y presión de biogás. También se diseñó el sistema de generación de energía en 3 etapas, tratamiento preliminar de las plumas, sistema de biodigestión y el sistema de generación de energía. Este sistema genera al día 34,74 m³ de biogás con una composición de 65,32% de CH₄ y 34,67% de CO₂, el cual produce un total de 26,67 kWh al día que representa un 22,23% de la demanda de energía total al día. Finalmente, se analizó la viabilidad económica y financiera donde S/54 752,14 es el Valor Actual Neto (VAN) y 32% la Tasa Interna de Retorno (TIR) ya que son positivos la inversión produce ganancias y se recuperara en un plazo de 1 año 11 meses y 29 días.

Palabras claves: Biogás, Residuos avícolas, Biodigestor

Abstract

The present research focuses on the proposal of a biogas generation system from waste from a poultry slaughter center for its use in energy, with this it is intended to cover a percentage of the energy consumption in the center and also reduce the factor pollutant that generates the lack of handling of these residues. Initially, the physical-chemical parameters of the waste (0,511 m³/day) were determined by secondary sources as dry matter (76%), C / N ratio (5-8), organic solids (17%), volatile solids (greater than 60%) and proteins (91%). In addition, the Chinese-type biodigester was evaluated as the most viable option to install, since when performing the weighted factors method, it stood out in terms of ease of maintenance, biogas production efficiency, useful life and biogas pressure. Also desing power generation system, preliminary treatment of the feathers, biodigestion system and the power generation system were also designed. This system generates 34.74 m³ of biogas per day with a composition of 65.32% CH₄ and 34.67% CO₂, which produces a total of 26.67 kWh per day, which represents 22.23% of the total energy demand per day. Finally, the economic and financial viability was analyzed where S / 54,752.14 is the Net Present Value (NPV) and 32% the Internal Rate of Return (IRR), since the investment produces profits and is recovered within a period of time 1 year 11 months and 29 days.

Keywords: Biogas, Poultry waste, Biodigester

Introducción

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO) para el año 2020 la carne de aves representará el 36% de la producción cárnica a nivel mundial y de esta la carne de pollo representará el 87,1% [1]. Tal crecimiento conlleva al aumento en la generación de residuos, además de contaminación debido a las grandes cantidades de sustancias contaminantes (nitrógeno, fósforo y azufre), estiércol y agua contaminada que se produce [2].

A nivel mundial una de las industrias del sector alimentario que más contamina es la industria cárnica. Gonzales [3] señala como principales problemas de esta industria a la producción elevada de residuos, la ubicación en zonas urbanas cercanas a poblaciones y el gran consumo de agua en el lavado de las instalaciones y el faenado del producto.

El Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA) señala que en Lambayeque existen 20 centros de faenado avícola, estos están concentrados en los distritos de José Leonardo Ortiz, Pomalca y La Victoria [4]. Dentro de los cuales se encuentra el centro de faenado avícola DIPROAVI SAC este se dedica a la crianza, sacrificio y distribución de aproximadamente 24 948 pollos mensuales en la provincia de Chiclayo.

En el año 2019 el centro generó 174 938 kg de residuos y 8 862 m³ de agua residual. Dichos residuos son vertidos en acequias cercanas o dispuestas en los lugares aledaños para su descomposición. Esto afecta tanto al factor aire, agua y suelo como a los pobladores que viven en los alrededores y amenaza la sostenibilidad y la sustentabilidad ambiental [5]. Existen varias alternativas para el aprovechamiento de residuos orgánicos y efluentes del sector avícola, una de las soluciones más atractivas es la producción de biogás. Ya que la excreta animal en su estado de descomposición anaerobia produce gas combustible, este contiene un alto porcentaje de metano (concentraciones mayores al 60% en gas), con un potencial calorífico inferior de 5,500 Kcal/m³ [6].

Ante esta problemática surge la pregunta de investigación ¿de qué manera se puede aprovechar los residuos de un centro de faenado avícola para la producción de biogás de uso propio? Con ello se tuvo como objetivo general proponer un sistema de generación de biogás a partir de residuos de un centro de faenado avícola para su aprovechamiento en energía. Los objetivos específicos fueron: Determinar la composición físico química de los residuos y las necesidades energéticas del centro de faenado avícola, evaluar el sistema óptimo para la generación de biogás a partir de residuos del centro de faenado avícola, diseñar el sistema para la generación de biogás en el centro de faenado avícola y su obtención de energía y realizar el análisis de la viabilidad económica y financiera del sistema de generación de biogás.

El estudio se realiza con la finalidad de darle una alternativa de uso a los residuos que no gestionados por el centro de faenado avícola. Así mismo, reducir el impacto ambiental que estos tengan en el ambiente receptor y los centros habitantes cercanos. Esta investigación abarca el estudio de los residuos emitidos en el proceso de faenado avícola que comprende la producción y procesado de aves. El sistema para la generación de biogás propuesto podrá ser aplicado en cualquier centro de faenado avícola que cuente con características similares a las presentadas. Entre las limitaciones del estudio, este no abarca las fases de implementación.

Revisión de la literatura

El proceso de faenado avícola comprende la producción y procesado de aves de corral. La producción de aves genera residuos de incubación, gallinaza, cama y mortalidad en las granjas. En el procesado se emiten aguas residuales y residuos sólidos orgánicos. En el faenado de aves

un 70-75% del peso vivo es aprovechado dejando un 30-25% del peso como residuo. Las plumas representan un 7-10% del peso de las aves y la sangre un 2% del peso del ave [7]. Los efluentes generados en esta actividad contienen sangre, estiércol, pelos, grasas, huesos, proteínas y otros contaminantes solubles. Estos tienen altas temperaturas y una relación de DBO: DBO₅: N de 12:4:1 [8].

Por otra parte, la digestión anaeróbica es un medio de degradación de biomasa que consiste en la descomposición de moléculas orgánicas complejas a sus componentes energéticos individuales por acción de microorganismos. De esta descomposición se genera un producto gaseoso denominado biogás [9].

Este tiene una composición de 55-70% de metano (CH₄), 35%- 40% de dióxido de carbono (CO₂) y un contenido energético de 6,0-6,5 kWh/m³ [10]. El biogás puede ser obtenido mediante la instalación de biodigestores, estos son unidades propicias para que se produzcan una serie de procesos biológicos, químicos y físicos que tienen como producto el gas metano. El biodigestor contiene líquido en su interior que posee ácidos orgánicos y que trabaja en condiciones anaeróbicas [11].

Además, Costa, Parzinello y Beaux en el *“Estudo do aproveitamento de resíduos avícola e lácteo na biodigestão anaeróbia: estabilidade do biofertilizante e biogás produzido”* recolectaron muestras de residuos de una granja de pollos y suero de la elaboración de queso mozzarella de una lechería con la finalidad de estudiar la factibilidad del proceso de digestión anaeróbica. Para ello realizaron el análisis fisicoquímico evaluaron el pH, Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), acidez volátil y alcalinidad (AL). Para cuantificar el gas formado desarrollaron ensayos en reactores anaeróbicos en botellas PET de 2 000 ml durante 35 días a una temperatura de 29°C. Como resultado tuvieron que la muestra de residuo avícola tuvo una producción de 2 400 cm³ [12].

También, Vivas, Hidalgo, Delgado y Banchón en su investigación *“Evaluación en la producción de biogás con desechos avícolas y bovinos para generar energía eléctrica”* analizó la composición del estiércol bovino y avícola y su potencial porcentaje de producción de CH₄. Además, realizó un diseño a escala de laboratorio, para lo cual consideró un tanque de preparación de mezcla y un tanque de almacenamiento de gas de Poli-cloruro de vinilo (PVC). El volumen de biogás generado durante 23 días fue de 130,20 litros lo cual permitió el consumo de 4,5 kW de energía por 15 segundos [13].

Aparte de ello, Aguilar en su tesis aplicativa *“Desarrollo e implementación de un biodigestor anaeróbico tipo rígido”* diseña un biodigestor de polietileno de alta densidad (PEAD) basado en el modelo chino. Este tiene una capacidad de 3 744 litros de mezcla agua-estiércol (4:1) con dimensiones de 2,2 m de diámetro y una altura de 1,7 m. Además, cuenta con un sistema de pretratamiento, biodigestión, remoción, almacenamiento de bioabono y filtración de biogás. [14]

Del mismo modo, Mantilla en su estudio *“Aprovechamiento energético de una granja energética de una granja ganadero- avícola”* estableció el diseño de un sistema continuo de producción de biogás con un tiempo de retención de 36 días. Así mismo, estimó la producción de biogás a través de los valores de estiércol, porcentaje de materia orgánica y producción aproximada de m³ de gas por kg de materia seca total obteniendo 64,35 m³ biogás/día por cada 1,98 kg de estiércol/día [15].

Por último, Ferrarez, Oleveira, Lacerda, Costa, y Aparisi en su estudio *“Supplying the energy demand in the chicken meat processing poultry with biogás”* realizaron un análisis de viabilidad económica para dos escenarios, uno es la venta de biogás generado en el centro

avícola y el otro donde para uso en el centro avícola y la venta del excedente. En el primer escenario la recuperación fue de 5,3 años y el segundo de 4,4 años. Por lo que concluyeron para satisfacer las necesidades de la unidad de procesamiento de carne era factible [16].

Materiales y métodos

La investigación es de tipo descriptivo, pues detalla el estado del centro avícola DIPROAVI SAC. Las variables estudiadas son: producción de biogás a partir de residuos del centro de faenado avícola y generación de energía.

Para cuantificar los residuos se partió de la cantidad de aves procesadas y los porcentajes de estimación proporcionados por la FAO. Estos fueron de 11% de grasas, el 10% de plumas húmedas, el 2% de sangre respecto al peso de lo producido y 80 kg de gallinaza por cada tonelada de pollo [7]. Con ello se calculó los residuos: grasas, plumas húmedas, sangre, gallinaza y el agua residual generada (m^3) se estimó en base a la investigación de Acosta [17]. Así mismo, se realizó la proyección de acuerdo a la data de la empresa estudiada por Acosta, teniendo esta un crecimiento anual del 2,76% [17]

La determinación de la composición físico-química de los residuos se basó en la investigación realizada por Vivas, Hidalgo, Delgado y Banchón [13], Menéndez y Reasco [18] y Acosta [17]. Se contrastó los parámetros pH, DBO (mg/l), DQO (mg/l) de los efluentes de la investigación de Acosta con el Decreto Supremo N°1 013 [19]. Posteriormente se calculó el consumo energético del centro de faenado avícola, de acuerdo a las máquinas que operan en este establecimiento y las luminarias presentes.

La selección del sistema de generación de biogás se basó en la información proporcionada por el *“Estudio para la evaluación socioeconómica y ambiental de tres prototipos de biodigestores en predios de pequeños productores lecheros”* de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias de Chile (ODEPA) [20] con ello se hizo la comparación entre los diferentes sistemas de biodigestión de acuerdo al método de matriz de factores ponderados. Se evaluó los parámetros: vida útil, presión biogás, fugas biogás, tamaño de biodigestor, mantenimiento, requerimiento de espacio, eficiencia de biogás e inversión. Para esto, se enfrentó los criterios (ver anexo 1) que se consideraron para determinar el sistema óptimo de generación de biogás. Se asignó el valor de 1 al factor más importante y valor 0 al que sin relevancia. Para la selección del sistema, se realizó una escala de 1 a 3 y con ello se procedió a evaluar.

El diseño del sistema para la generación de biogás empezó desde el pretratamiento de plumas propuesto por Schommer, Wenzel y Daroit [21]. Se determinó la biomasa requerida y el sustrato de agua en base a las cantidades proyectadas al 2025 y la metodología del libro *“Fundamentos para el diseño de biodigestores”* de Olaya [22].

Luego, se diseñó el sistema de biodigestión que comprende a la cámara de carga, biodigestor, cámara de bioabono y tanque de almacenamiento de biogás. Las dimensiones de la cámara de carga se determinaron por la cantidad de residuos generados al día. Por otro lado, para el dimensionamiento del biodigestor se evaluó el tiempo de retención de acuerdo a la lectura del factor de corrección [22] acorde a la temperatura promedio del entorno del establecimiento que es de 25°C (ver anexo 2). Con el tiempo de retención y la biomasa diaria se calculó el volumen de diseño del biodigestor. Siguiendo la metodología de Olaya [22] se calculó el volumen de compensación (V_c), volumen de cúpula (V_e) y volumen de almacenamiento de gas (V_g) del biodigestor considerando un 4% adicional al volumen de diseño, con esto Olaya plantea: $V_e + V_c = 1,04V_d$.

Así mismo, se calculó el radio y la altura de volumen complementario (hc) de acuerdo a las ecuaciones planteada por Olaya [22]: $r = \sqrt[3]{\frac{3}{2\pi}} \times Ve$ y $hc = r/5$. Una vez determinado los valores de r y hc, se procedió a realizar el chequeo de las medidas de Ve, Vc y Vd, además del valor de Vg con lo siguiente: $Ve = \frac{2}{3}\pi \times r^3$, $Vc = \frac{1}{3}\pi \times hc \times r^2$, $Vd = (Ve + Vc)/1,04$ y $Vg = \frac{\pi h}{6} [3a^2 + 3b^2 + h^2]$.

Para el dimensionamiento del cámara de bioabono se calculó la carga de bioabono generada por el sistema, sabiendo que este se retira una vez terminado el tiempo de retención (28 días). Para ello, Rodríguez [23] señala que el 94,85% de la biomasa se convierte en digestato o bioabono. Para determinar las dimensiones del tanque de almacenamiento de biogás primero se halló la cantidad de biogás producido al día donde se utilizó la fórmula propuesta por Lantz y Sevansson [24] citado por Mantilla [15] en el estudio de “*Aprovechamiento energético de una granja ganadero-avícola*”: $PG = MPC * SO * P$, dónde: gas producido en kg por día (PG), estiércol en kilogramos por día (MPC), porcentaje de materia orgánica del estiércol según animal (SO) y producción aproximada de m³ de gas/1kg de masa orgánica seca total (P). Teniendo este valor, se calculó el diámetro (\emptyset) y altura del tanque (Hb) con las ecuaciones propuestas por Delgado [25]: $\emptyset = \sqrt[3]{\frac{3volumen*4}{\pi}}$ y $Hb = \frac{volumen*4}{\pi*\emptyset}$.

Luego, se diseñó el sistema de generación eléctrica que comprende al desulfurador y grupo electrógeno. Para el cálculo de dimensiones del desulfurador se evaluó el flujo volumétrico y flujo másico de biogás, CH₄ y H₂S. Con estos valores se determinó el volumen de hierro y aserrín en el desulfurador, de acuerdo a lo propuesto en la investigación de Rojas [26]: $CE_{Fe} = CE_S \times n_{Fe \rightarrow S}$, donde: capacidad de eliminación de hierro (CE_{Fe}), capacidad de eliminación de azufre (CE_S) y rendimiento de eliminación de hierro por azufre ($n_{Fe \rightarrow S}$); y $V_{Fe} = \frac{CE_{Fe}}{\rho_{Fe}} \times d$, dónde: volumen de hierro en desulfurador (V_{Fe}), capacidad de eliminación de hierro (CE_{Fe}) y periodo laboral (d). La suma de estos dio como resultado el volumen total del desulfurador.

Por otro lado, en el dimensionamiento del desulfurador se calculó el área transversal (A_t) y la altura (h) [26] determinado por: $A_t = \frac{V_{biogás}}{v_{biogás}} = \pi \left(\frac{\emptyset}{2}\right)^2$, donde: caudal volumétrico de biogás ($V_{biogás}$), velocidad del biogás ($v_{biogás}$) y diámetro del desulfurador (\emptyset); y $h = \frac{V_t}{A_t}$, donde: volumen total del desulfurador (V_t). Así mismo, se evaluó la cantidad de biogás limpio producido y los porcentajes de CH₄ y CO₂. El grupo electrógeno se seleccionó de acuerdo a Kaparaju y Rintala, Tchbanouglos *et al.* [27] citado por Lara [28] (ver anexo 3). De acuerdo al consumo y producción de energía del motor se halló el consumo de energía. Posteriormente, se realizó un análisis del balance de materia.

Se proyectó con un 2,76% anual la energía total y de maquinarias con lo cual se determinó los porcentajes de energía cubierta por el sistema. Además se calculó el área total del sistema de generación de biogás utilizando el Método Guerchet.

El cálculo de la mano de obra y materiales de construcción se realizó basado en el estudio de Almanza [29] “*Construcción y evaluación de un biodigestor modelo chino mejorado para zonas andinas*”, estos fueron adaptados a las dimensiones del biodigestor diseñado. En cuanto a la construcción del desulfurador se consideró lo investigado por Delgado [25], dado la similitud entre las dimensiones del desulfurador diseñado y el propuesto por Delgado. Por último, se realizó el flujo de caja y la evaluación económica financiera donde se analizaron el VAN, TIR y Beneficio/costo.

Resultados y discusión

Estimación de residuos del centro de faenado avícola

El centro de faenado avícola “DIPROAVI S.A.C” se dedica a la crianza, sacrificio y distribución de aves para consumo. Este centro en el 2019 produjo alrededor de 24 908 pollos mensualmente, siendo estos distribuidos alrededor de Chiclayo.

Para determinar el agua residual generada, se tuvo como referencia la investigación de Acosta [17] donde los efluentes representan un 1,345% del peso de las aves. Con todo ello, el centro avícola generó 72 212 kg de grasa, 65 647 kg de plumas húmedas, 13 129 kg de sangre, 23 950 kg de gallinaza y 8 862 m³ de agua residual en el año 2019.

El crecimiento anual es de 2,76% [17], lo que indica que para el año 2025 las cantidades de residuos generadas por el centro aumentarían un 17,73% tal como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Proyección de residuos del centro de faenado avícola DIPROAVI SAC en el periodo 2019

Año	Grasas (kg)* 11% de Kg	Plumas húmedas (kg)* 10% de kg	Sangre (kg)* 2% de kg	Gallinaza (kg)* 80 kg por cada 1 000 pollos	Agua residual generada (m ³) ** 1,35% de kg
2019	72 212	65 647	13 129	23 950	8 862
2020	74 203	67 457	13 491	24 611	9 107
2021	76 249	69 317	13 863	25 289	9 358
2022	78 351	71 228	14 246	25 986	9 616
2023	80 511	73 192	14 638	26 703	9 881
2024	82 731	75 210	15 042	27 439	10 153
2025	85 013	77 284	15 457	28 196	10 433

Fuente: DIPROAVI SAC

(*) Cuantificación en base a las aproximaciones de la FAO [7]

(**) Cuantificación en base a la investigación de Acosta

Composición físico química de los residuos del centro de faenado

El estiércol avícola tiene un porcentaje de materia seca del 76% y materia orgánica en 64,7% lo que hace posible que este pueda ser aprovechable para la generación de biogás, cuyos componentes esenciales son CH₄ y CO₂. Hilbert en el “Manual para la producción de biogás” determinó que con aprovechamiento del estiércol avícola se puede lograr hasta un 60% de CH₄ [30].

Por otro lado, para la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia [31] el estiércol avícola tiene un 17% de sólidos orgánicos y una relación C/N de 5-8 lo que genera una producción de biogás de 0,4 m³ de gas/1kg de sólidos orgánicos. Estos parámetros se obtienen debido a la mezcla de estiércol avícola y aguas de lavado en una proporción de 1:1 [32].

Los indicadores de ST, SV, concentración de nitrógeno, proteínas y lípidos hacen posible que los residuos de avícolas sean potenciales para la generación de biogás. Ya que para la producción de CH₄ es primordial que la biomasa contenga gran porcentaje de SV y proteínas tal como lo señala Caldera [33] en su investigación “Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales de una industria avícola” donde los residuos tales como excretas, plumas y sangre tienen entre 60% y 96,7% de Sólidos Volátiles y entre 91% y 98% de proteínas.

Sin embargo, para Owamah, Alfa y Onokwai [34] la cogestión anaeróbica de la pluma de pollo tiene efectos negativos de hasta un 75% en la producción de biogás cuando la masa de plumas ocupa un 75% del total de la biomasa, debido a que no se realiza ningún pretratamiento químico o enzimático en ella. A razón de ello, Schommer, Wenzel y Daroit [21] proponen como tratamiento a la hidrólisis, ya que beneficia a la producción de CH₄ debido a la mejora en la biodegradabilidad de la pluma. Así mismo, la pluma hidrolizada supera a la sin tratamiento en un 7,7% de ST, 5,7% de sólidos volátiles [21] y 122,2% en producción de CH₄ [35].

Para determinar si el aprovechamiento de la sangre avícola para la producción de energía es factible Menéndez y Reasco [18] realizaron un estudio donde tomaron como muestra 500 ml de sangre donde se tuvo como resultado un DQO de 20 460 mg/l y 6 890,8 mg/l de SV. Debido a las grandes concentraciones de DQO y SV este residuo resulta tener un gran contenido energético.

En la Tabla 2 se observa los parámetros físico químicos de los efluentes, se tomó como referencia la investigación realizada por Acosta [17] en la que se evalúa los parámetros: pH, DBO, DQO, sólidos sedimentables, coliformes termo tolerantes y aceites y grasas. Según el Decreto Supremo N°1013 [19] estas cantidades se encuentran fuera de los límites máximos permisibles tanto el pH, DBO y DQO. Por tanto, el efluente del centro avícola representa una fuente de contaminación para el ambiente.

Tabla 2. Comparación de los parámetros físico- químicos de los efluentes avícolas y los límites máximos permisibles

Parámetros	Resultados avícolas	Límites máximos permisibles
pH	6,62	6,0-9,0
DBO (mg/l)	2 150	250
DQO (mg/l)	2 902,5	500
Sólidos sedimentables (mg/l)	35	-
Coliformes Termo tolerantes (NMP/100ml)	2,80E+06	-
Aceites y Grasas (mg/l)	219,51	-

Fuente: Acosta, 2016 [17]

Mantilla [15] define al tipo de sustrato como un factor que puede llegar a afectar los microorganismos presentes en la producción de biogás. Para poder identificar las condiciones de este sustrato es preciso conocer la actividad metanogénica. Este proceso indica la capacidad de la biomasa para transformar la materia orgánica en CH₄; se define como la masa de sustrato en forma de DQO (Demanda Química de Oxígeno) que es convertida a CH₄.

Además, los parámetros que ayudan al proceso metanogénico y hacen parte de una caracterización del sustrato, son: temperatura (T), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), conductividad, alcalinidad, nitritos y nitratos, fosfatos, sulfatos, humedad, materia orgánica, hierro, pH, oxígeno disuelto, relación carbono – nitrógeno. Estos parámetros ayudan a conocer la capacidad que tiene el sustrato para generar CH₄ [15].

Necesidades energéticas del centro de faenado

Este centro trabaja entre 6 a 7 días a la semana en un periodo de 9 horas y tiene un consumo mensual de 75,36 kWh detallado en la Tabla 3.

Tabla 3. Consumo del centro de faenado avícola DIPROAVI SAC

	N°	Horas de funcionamiento al día	Potencia	Consumo por día (kWh)
Fluorescentes	20	10	60 W	12
Congelador	1	24	890 W	21,36
Tanque escaldador	2	9	1,5 kW	27
Transportador	1	9	2,2 kW	19,8
Total				75,36

Fuente: DIPROAVI SAC

El pago de energía del centro oscila entre los S/ 700 a S/ 1 000 por mes. Además, el centro cuenta con cocinas en función a gas y carbón.

Sistema óptimo para la generación de biogás a partir de residuos del centro de faenado avícola

Del enfrentamiento de factores se obtuvo que los criterios más importantes para la elección del sistema de generación de biogás son el mantenimiento (18%), por la influencia que este tiene en la vida útil, eficiencia y seguridad, eficiencia de biogás (16%), por influir en la vida útil y presión de biogás, vida útil (13%) y presión de biogás (13%). En la Tabla 4 se muestra los resultados de la selección del tipo de biodigestor siendo el más óptimo el biodigestor modelo chino, ya que los costes de inversión y mantenimiento son bajos, tiene bajo requerimiento de espacio y una larga vida útil. A diferencia del biodigestor tradicional con cúpula de polietileno que tiene una vida útil corta de 2 a 5 años, y el biodigestor horizontal el cual tiene una baja presión de gas y necesita del uso de bombas de gas, además de tener una vida útil corta. Por lo que es considerado como una alternativa transitoria [20].

Tabla 4. Factores ponderados para elección del biodigestor

FACTORES	%	Modelo Chino	Tradicional con Cúpula de polietileno	Horizontal o flexible
Vida útil	13%	0,39	0,13	0,13
Presión biogás	13%	0,26	0,13	0,26
Fugas biogás	11%	0,11	0,32	0,32
Tamaño de biodigestor	11%	0,32	0,11	0,21
Mantenimiento	18%	0,55	0,55	0,55
Requerimiento de espacio	8%	0,24	0,16	0,08
Eficiencia del biogás	16%	0,32	0,16	0,47
Inversión	11%	0,32	0,21	0,11
Total		2,50	1,76	2,13

Diseño del sistema para la generación de biogás en el centro de faenado avícola

Pretratamiento de plumas

El diseño del sistema empieza desde el pretratamiento de las plumas para que sean adicionadas al sistema de digestión, para ello se siguió una serie de procedimientos señaladas por Schommer, Wenzel y Daroit [21] tales como lavado, aclarado e hidrolizado. Este proceso de hidrólisis consiste en un tratamiento bajo presión que genera que las fibras se desintegren, para una posterior deshidratación mecánica mediante una prensa rodillo [36]. Según Yuliati y Sukma se maneja en presiones de 207 a 690 kPa de 6 a 60 minutos con una humedad del 60% al 70% [37]

Al día el centro de faenado genera 211,7 kg de plumas húmedas, partiendo de ello se seleccionó la capacidad de la máquina de hidrolizado de 200-300 kg/h. Debido al proceso de hidrólisis se pierde un 25% de la masa de plumas inicial [21], por lo que el total de plumas hidrolizadas que se vierten al sistema de digestión es de 158,8 kg/día.

Biomasa requerida

La cantidad de residuos producidos al día por la avícola es de 511,3 kg lo que incluye los residuos: grasas, plumas hidrolizadas, sangre y gallinaza. La cantidad de mezcla de agua es de 0,511 m³/día. De la suma de las cantidades mencionadas se tiene un total de biomasa de 1,02 m³/día.

Para el dimensionamiento del biodigestor se obtuvo un factor de corrección de 1,4 con lo cual el tiempo de retención es de 28 días. Por tanto el volumen necesario fue de 28,63 m³ el cual se redondeó a 28,7 m³ para el volumen de diseño.

Proceso de operación del sistema

Una vez las plumas han sido hidrolizadas, estas se adicionan con los demás residuos y el agua a la cámara de carga, donde se mezclará toda la biomasa producida al día. Luego esta pasará al biodigestor a través de una tubería, la biomasa permanecerá en el biodigestor el tiempo que sea señalado por el tiempo de retención. Después, el biogás generado por la digestión pasará a través de tuberías continuamente para ser almacenado en un tanque. Posteriormente, pasa al desulfurador donde se elimina el ácido sulfhídrico (H₂S) y se obtiene el gas purificado para ser adicionado como combustible del grupo electrógeno.

Diseño del sistema de biodigestión

a) Cámara de carga

Las dimensiones fueron determinadas por la cantidad de residuos que se genera en un día que es de 1,02 m³, con lo cual las medidas resultantes del tanque son 1,01m x 1,01m x 1,01 m.

b) Biodigestor

Para el diseño se calculó el volumen de compensación (V_c), volumen de cúpula (V_e) y volumen de almacenamiento de gas (V_g). Debido a que la construcción del biodigestor es con ladrillos y este debe tener un repello, se consideró un 4% adicional al volumen de diseño, así mismo Olaya [22] indica que se debe hacer un chequeo de las medidas de V_d, V_c y V_e antes obtenidas, tal como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Dimensionamiento del biodigestor

Abr.	Dimensión	Cant.	Uds.
Vd	Volumen de diseño	28,7	m ³
Ve	Volumen de la cúpula	27,13	m ³
Vc	Volumen de compensación	2,71	m ³
r	radio de la cúpula	2,4	m
hc	altura de volumen complementario	0,47	m
Chequeo de volumen de diseño			
Vd	Volumen de diseño	28,74	m ³
Ve	Volumen de la cúpula	27,18	m ³
Vc	Volumen de compensación	2,72	m ³

Además, la cámara de digestión tiene una tubería superior que recoge el biogás acumulado y lo conecta al tanque de almacenamiento. Así mismo, el cuello del biodigestor cuenta con un diámetro de 0,8 m para el ingreso de personal de mantenimiento.

Para el valor del volumen de gas se obtuvo un espacio de $5,5 \text{ m}^3$ para el volumen de biogás producido continuamente. En la Figura 1 se muestra la vista transversal del biodigestor, donde se señaló las dimensiones calculadas y en el Anexo 4 se muestran las vistas frontal, lateral y de planta del biodigestor ubicado en el sistema.

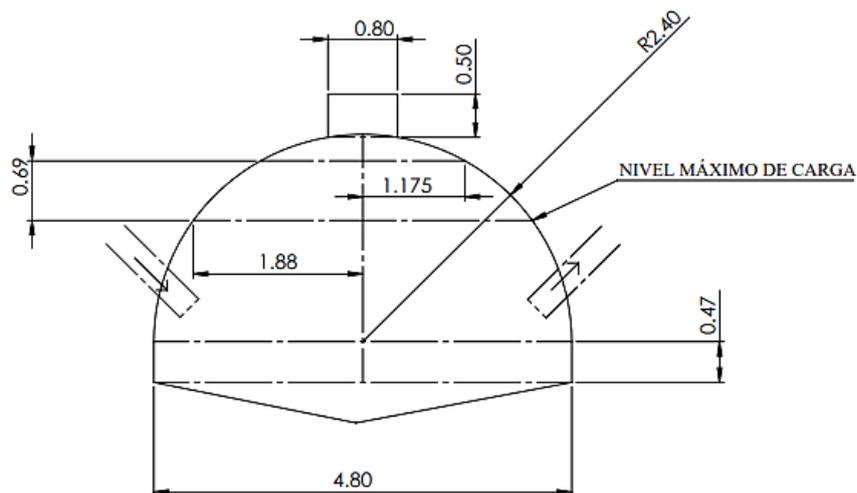


Figura 1. Vista transversal de biodigestor

c) Cubículo de bioabono

Para el dimensionamiento del cubículo de bioabono se calculó la carga de bioabono generada por el sistema, sabiendo que este se retira una vez terminado el tiempo de retención (28 días). Para ello, Rodríguez [23] señala que el 94,85% de la biomasa se convierte en digestato o bioabono, entonces se obtuvo $27,77 \text{ m}^3$ de bioabono. Este se retirará en 8 secciones por lo cual el tanque tendrá un volumen de $3,47 \text{ m}^3$ y las medidas $1,51 \text{ m} \times 1,51 \text{ m} \times 1,51 \text{ m}$.

d) Tanque de almacenamiento de biogás

El tanque de almacenamiento es de material de Poli-cloruro de vinilo (PVC) así como el utilizado en el estudio “*Evaluación en la producción de biogás con desechos avícolas y bobino para generar energía eléctrica*” [13]. Se consideró una válvula de salida de biogás del biodigestor y una válvula de entrada del gasómetro. La última está ubicada en la parte inferior del tanque de almacenamiento lo que permite eliminar el agua contenida en el biogás cada vez que ésta se condense [38].

Así mismo, se calculó una producción de $34,76 \text{ m}^3$ de biogás/día. Partiendo de esta cantidad y el procedimiento seguido por Delgado [25] se halló el diámetro del tanque con lo cual se obtuvo $1,66 \text{ m}$ y en cuanto a la altura se obtuvo $2,75 \text{ m}$ mostrado en la figura 2. Por motivo de estabilidad y seguridad para el centro, se optó por que el tanque este posicionado de manera horizontal.

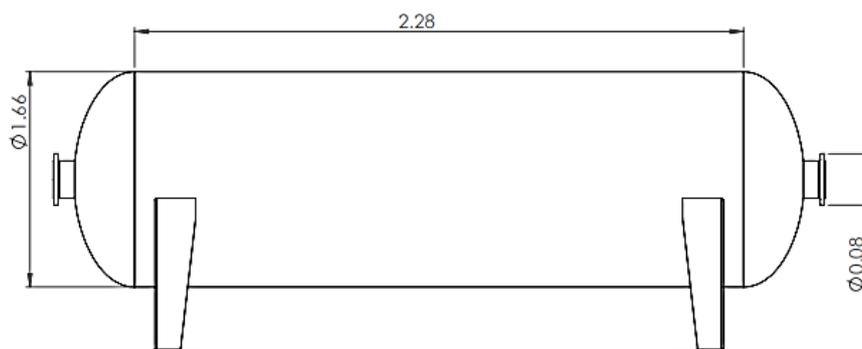


Figura 2. Vista del tanque de almacenamiento

e) Tuberías de transporte de biogás

Las tuberías instaladas para el transporte del biogás desde el biodigestor al gasómetro son de tipo anticorrosivas con diámetro de 3,2 cm.

f) Tuberías de transporte de biomasa

Para la tubería que conduce la biomasa se consideró un diámetro de 12 pulgadas ya que este no debe taponarse con la materia que ingresa.

Diseño de sistema de generación eléctrica

a) Desulfurador

Según Kaparaju y Rintala *et al.* [27] para la utilización del biogás se requiere de una limpieza exhaustiva, donde se elimina compuestos como H_2S . De acuerdo con Grass [39] citado por Vivas *et al.* [13] las impurezas del biogás disminuyen su calidad (poder calorífico), por ello para el diseño se tomó en cuenta la instalación de un purificador de biogás para la remoción de H_2S .

La cantidad de CH_4 que se produce es el 60% del volumen del gas, así mismo el H_2S representa el 3,8% [6]. Con ello se obtuvo los valores señalados en la Tabla 5.

Tabla 5. Cantidades de flujo másico y volumétrico por biodigestor

Gases producidos	Flujo de masa (kg/h)	Flujo volumétrico (m^3/h)
Biogás	1,039	1,449
CH_4	0,623	0,869
H_2S	0,085	0,055

Según Montalvo y Guerrero [40] para eliminar 0,35 kg de H_2S se necesita 1kg de Hierro (Fe) y el desulfurador tiene una proporción de Fe y aserrín de 60% y 40% respectivamente [40] por lo consiguiente se obtuvo que volumen de Fe es de $0,02m^3$, el volumen de aserrín es de $0,012m^3$ y el volumen total del desulfurador es de $0,03m^3$ con dimensiones de 0,18 m de diámetro y una altura de 1,23 m.

Con todo ello, se calculó la cantidad de biogás limpio, restándole a la cantidad inicial de biogás (1,039 kg/h) menos la cantidad de H_2S (0,085 kg/h) retenida en el desulfurador, obteniendo 0,954 kg biogás /h. Resultando la composición del biogás con un 65,32% de CH_4 y un 34,67 de CO_2 . Así mismo el flujo volumétrico de biogás limpio es de $0,6 m^3/h$.

b) Grupo Electrónico

Para el sistema se seleccionó al motor debido a la potencia constante de 3,5 kW que cumple con el requerimiento de energía por hora del centro avícola. Así mismo, este motor requiere de un biogás con un porcentaje de CH₄ que supere el 65% con el cual cumple el sistema.

De acuerdo a Aqualimpia Engineering [41] se obtiene un factor de conversión de 2,2 kWh de electricidad por cada m³ de biogás. Con ello se obtendría una producción de energía al día de 35,2 kWh. Pero la producción de energía está sujeta al consumo de m³ biogás/h del grupo electrónico, por lo que se obtiene un trabajo al día de 7 h 37' con un consumo constante de 2,1 m³/h, dado que el mayor consumo de energía se produce en las horas de producción (9 h) se cubre el 85% de la energía demandada por jornada de trabajo. En este tiempo se genera 26,67 kWh lo que cubre el 30% de la demanda de energía total. Como resultado del diseño del sistema se obtiene lo mostrado en la Figura 3, la vista lateral de este en el Anexo 5 y las instalaciones en la Figura 4.

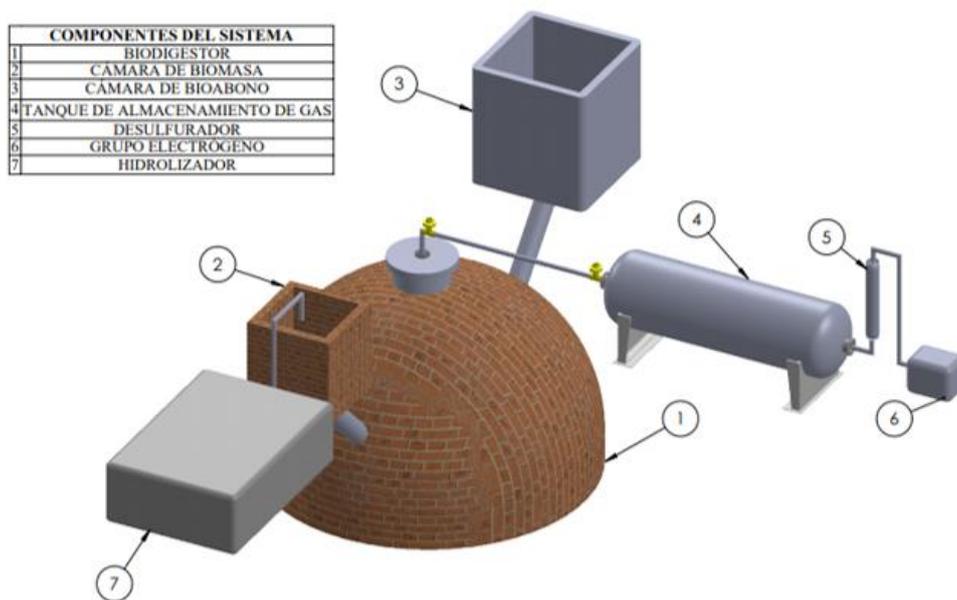


Figura 3. Diseño del sistema de generación de energía

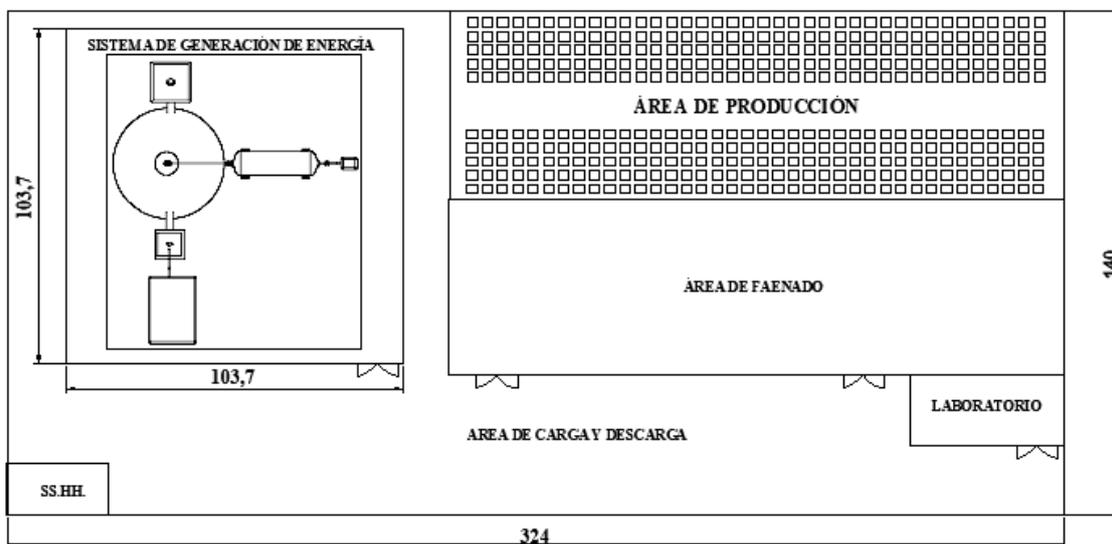


Figura 4. Ubicación de las Instalaciones del sistema de generación de energía

Balance de materia

Del balance de materia detallado en la Figura 5 se deduce que por cada 3 m³ de biogás purificado se generará 5 kWh de energía, además la composición de este es de un 65,3% de CH₄ y un 34,7% de CO₂.

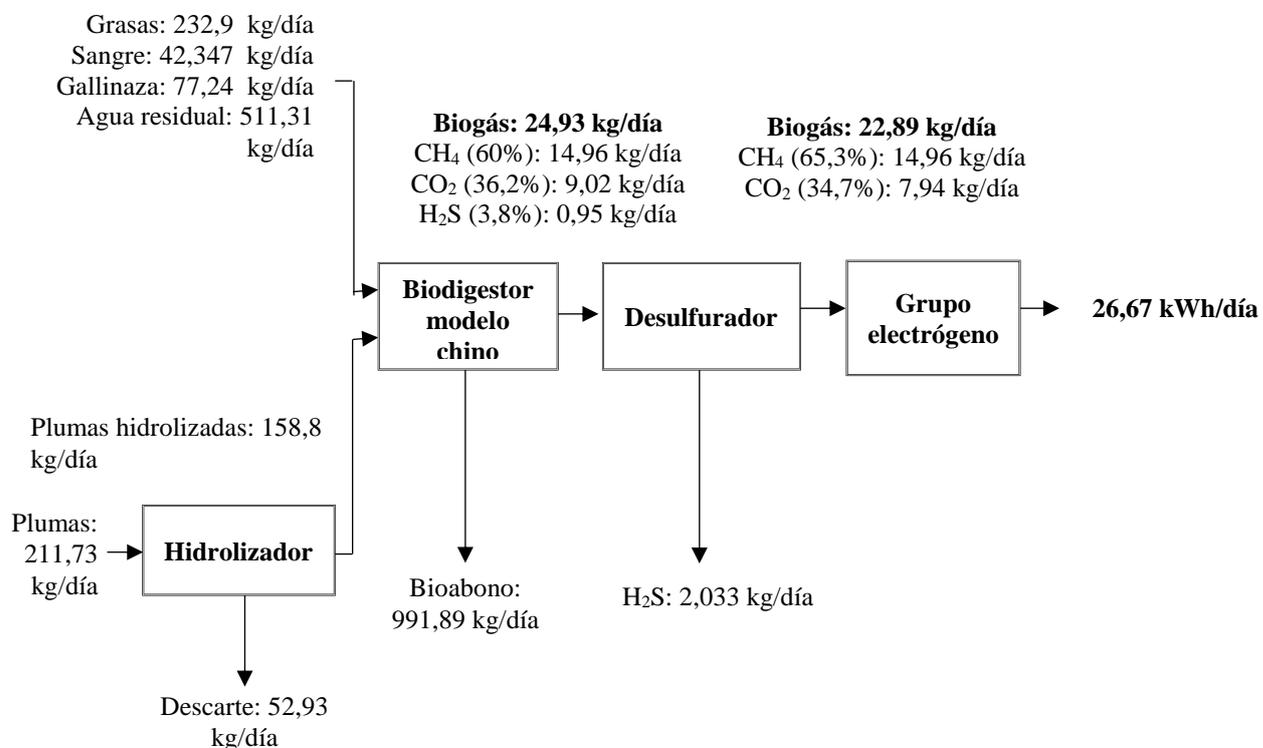


Figura 5. Balance de materia del sistema

Utilización de energía

Laines y Sosa [42] reportan que la generación de biogás en un biodigestor tipo cúpula fija o Chino se da a partir del día 5, por ello se consideró que la producción de biogás se da por 24 días. La energía demandada está determinada por el consumo de las máquinas de congelado, tanque de escaldado, transportador e hidrolizador, este consumo se señala en la Tabla 6, se proyectó a un porcentaje de 2,76% [17], lo que según indica que para el año 2025 las cantidades de energía demandada por el centro aumentarían un 17,73% respecto al 2019.

Tabla 6. Proyección de demanda de energía mensual del centro de faenado avícola DIPROAVI SAC 2019-2025

Año	Energía total (kWh)	Energía de maquinaria (kWh)
2019	2 446,1	1 908,5
2020	2 513,6	1 961,2
2021	2 583,0	2 015,3
2022	2 654,3	2 070,9
2023	2 727,5	2 128,1
2024	2 802,8	2 186,8
2025	2 880,2	2 247,2

Fuente: DIPROAVI SAC

Para el año 2025 en 28 días se consumirán 2 880 kWh. Así mismo, la producción de biogás limpio será de 550 m³ que generará 640 kWh de energía. Esto representa un 22,23% de la energía total y un 28,49% de la energía de maquinarias.

4.5.8. Método Guerchet

En el Anexo 6 se detalla la aplicación del método, donde se obtuvo un total de 107,5 m² que ocupará el sistema de generación de energía en el centro de faenado avícola.

Análisis de viabilidad económica y financiera

Inversión

En la inversión el capital de trabajo estuvo determinado por el costo de producción en el año 1, tal como se señala en el Anexo 7. Así mismo, se tuvo una inversión total de S/ 123 794,02 entre costos de inversión tangible e intangible, capital de trabajo e imprevistos, todo ello detallado en la Tabla 7.

Tabla 7. Inversión total

Inversión	Total (S/)
Inversión tangible	79 485,13
Inversión intangible	3 300,00
Capital de trabajo (costo de producción por un año)	39 783,20
Imprevistos	1 225,68
Total	123 794,02

Financiamiento

Según la información brindada por la Superintendencia de Banca, Seguros y AFP (SBS) [43] la tasa de interés anual para préstamos a más de 360 días para pequeñas empresas es de 11,18% brindada por el Banco Crediscotia, el servicio de deuda es detallado en la Tabla 8.

Tabla 8. Servicio de deuda

AÑO	2021 (S/)	2022 (S/)	2023 (S/)	2024 (S/)	2025 (S/)
Deuda	123 794,02	123 794,02	97 578,66	68 432,42	36 027,64
Amortización	0,00	26 215,36	29 146,23	32 404,78	36 027,64
Interés	13 840,17	13 840,17	10 909,29	7 650,74	4 027,89
Cuota	13 840,17	40 055,53	40 055,53	40 055,53	40 055,53

Ingresos

En la Tabla 10 se señala los ingresos que fueron determinados por la energía eléctrica que sustituirá el sistema de generación de energía, el ahorro por sanciones otorgadas (ver Anexo 8) por la Municipalidad de Chiclayo [44] y la venta de compost resultante del sistema considerando un 10% de pérdida de masa. Se considera la comercialización del compost ya que según la investigación de Cachay [45] en la región de Lambayeque se necesitan 25 toneladas de compost por cada hectárea de terreno agrícola siendo así lo siguiente:

Tabla 9. Toneladas demandadas de compost en la región Lambayeque

AÑOS	DEMANDA (t)	OFERTA DE LA AVÍCOLA (t)
2021	3 832 144	268,2
2022	3 998 702	275,8
2023	4 165 260	283,6
2024	4 331 818	291,7
2025	4 498 376	299,9

Para la tarifa de kWh se consideró un costo de S/ 0,721 referido por el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN) [46]. Así mismo, el precio de venta del compost fue referido del Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Provincia de Chiclayo [47] donde por cada tonelada de compost tiene el precio de S/450.

Tabla 10. Ingresos por sistema

Ingresos	2021 (S/)	2022 (S/)	2023 (S/)	2024 (S/)	2025 (S/)
Ahorro por energía eléctrica	4 952,16	5 092,72	5 237,27	5 385,92	5 538,79
Ahorro por sanción	21 285,00	21 285,00	21 285,00	21 285,00	21 285,00
Venta de bioabono	120 676,64	124 101,86	127 624,29	13 1246,70	134 971,92
Total	14 6913,80	150 479,57	154 146,55	157 917,61	161 795,71

Flujo de caja

El flujo de caja es detallado en la Tabla 11 donde se deduce que para el año 5 la corriente de liquidez neta será de S/ 34 522,08 a diferencia que la del año 1 que es S/ 86 358,39 la diferencia radica en el aumento del costo de producción a lo largo de los años y la falta de amortización de préstamo en el primer año.

Tabla 11. Flujo de caja

	Año 0 (S/)	Año 1 (S/)	Año 2 (S/)	Año 3 (S/)	Año 4 (S/)	Año 5 (S/)
<u>Inversión</u>						
Inversión tangible	79 485,13					
Inversión intangible	3 300,00					
Capital de trabajo por un año	39 783,20					
Imprevistos	1 225,68					
Total inversión	123 794,02					
<u>Ingresos</u>						
Ingresos por propuesta		146 913,80	150 479,57	154 146,55	157 917,61	161 795,71
Total ingresos		146 913,80	150 479,57	154 146,55	157 917,61	161 795,71
<u>Egresos</u>						
Costos de producción		0,00	47 121,27	51 833,40	57 016,74	62 718,41
Gastos de comercialización		12 000,00	12 000,00	12 000,00	12 000,00	12 000,00
Intereses del préstamo		13 840,17	13 840,17	10 909,29	7 650,74	4 027,89
Amortización de préstamo		0,00	26 215,36	29 146,23	32 404,78	36 027,64
Depreciación		5 356,14	5 356,14	5 356,14	5 356,14	5 356,14
Total de egresos		31 196,31	104 532,94	109 245,07	114 428,41	120 130,08
Saldo bruto (antes de impuestos)		115 717,49	45 946,63	44 901,48	43 489,20	41 665,62
Impuesto a la renta (30%)		34 715,25	13 783,99	13 470,44	13 046,76	12 499,69
Saldo (después de impuestos)		81 002,24	32 162,64	31 431,04	30 442,44	29 165,94
Depreciación		5 356,14	5 356,14	5 356,14	5 356,14	5 356,14
Saldo final (déficit/superávit)	-123 794,02	86 358,39	37 518,78	36 787,18	35 798,59	34 522,08
Utilidad acumulada	-123 794,02	-37 435,63	83,16	36 870,34	72 668,92	107 191,00
Corriente de liquidez neta	-123 794,02	86 358,39	37 518,78	36 787,18	35 798,59	34 522,08

Evaluación económica financiera

Se evaluó si el proyecto era aprobado basado en el VAN y TIR. Estos fueron de S/ 54 752,14 y 32% respectivamente, al ser positivos los dos generan ganancias. Así mismo, el indicador Beneficio/Costo fue de 1,44 por lo cual por cada sol invertido se gana S/ 0,44. Con respecto al periodo de recuperación este es de 1 año 11 meses y 29 días.

Discusión

La composición físico química de los residuos del centro de faenado hace posible que estos puedan ser aprovechados en la producción de biogás. Ya que los residuos tienen un 17% de sólidos orgánicos y una relación C/N de 5-8, lo que propicia la estimación de producción de biogás. No obstante, se tuvo en cuenta que no todos los residuos pueden ser adicionados al sistema de digestión, para tal caso se propuso el tratamiento previo de las plumas de aves según lo expuesto por Schommer, Wenzel y Daroit [21] ya que no realizarlo generaría efectos negativos de hasta un 75% en la producción de biogás cuando el peso de plumas ocupa un 75% del total de la biomasa [34].

Costa, Parzinello y Beaux determinaron que el proceso de digestión anaeróbica es el óptimo para el aprovechamiento de residuos avícolas [12]. De la misma forma, Vivas, Hidalgo, Delgado y Banchón proponen que se genere biogás a partir de un sistema anaeróbico [13]. La FAO [48] en el *“Manual del biogás”* presenta como biodigestores semi continuos a los que agregan volúmenes de cargas regularmente. Entre ellos se encuentran el modelo chino, indiano y horizontal. Por otro lado, la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) de Chile [20] después de comparar las tecnologías disponibles de biodigestores (ver anexo 9) se concluyó que las más aptas eran el digestor tipo “chino”, tradicional con cúpula de polietileno y horizontal. Así mismo, Aguilar [14] en su tesis aplicativa también opta por el diseño e instalación de un biodigestor anaeróbico o modelo chino, este es alimentado por excretas de ganado ovino y tiene una capacidad de 3 744 litros de mezcla agua-estiércol (4:1).

Por otra parte, para Sunada [49] citado por Feroldi, Urio, Araújo y Cremonez [50] los efluentes del procesamiento de aves de corral tienen una alta capacidad de producción de biogás. Por lo que se optó por este como el sustrato de agua del biodigestor en una proporción de 1:1 con respecto a los residuos.

Con respecto a la seguridad de la instalación del biodigestor tipo chino, Martínez, Méndez y Flores [51] en el estudio *“Análisis de tensiones Von Mises en biodigestores anaerobios de cúpula rígida”* determinaron que la presión interior de biogás en el biodigestor no es peligrosa ya que no afecta las estructuras de las paredes, cúpula y cuello.

Rodríguez [23] en su investigación *“Estudio y diseño preliminar de una instalación de cogeneración con biogás para una granja avícola autónoma”* realizó el mismo procedimiento utilizado en la investigación para el cálculo de la producción de biogás con lo que obtuvo una carga de biomasa inicial de 3 240 kg/día y una producción de 220,3 m³ de gas/día. Una vez el biogás es purificado este es apto para ser utilizado como combustible de electricidad. Kaparaju y Rintala, Tchbanouglos *et al.* [27] citado por Lara [28] presentan una serie de diferencias entre los motores alternativos, turbina a gas, micro turbina, motor Stirling y pila de combustible (Anexo 3) de todos ellos el que resulta más beneficioso son los motores alternativos ya que son de bajo costo de inversión y mantenimiento.

La composición del biogás obtenido es de un 65,3% de CH₄ y un 34,7% de CO₂ valor que es similar al reportado por Hilbert en el *“Manual para la producción de biogás”* donde

determinó que el aprovechamiento del estiércol avícola se puede lograr hasta un 60% de CH₄ [30].

Por último, el valor de VAN y TIR resultó óptimo debido a la pequeña inversión que representa el sistema. En este análisis se optó por usar la energía producida por el sistema como consumo propio, tal como Ferrarez, Oleveira, Lacerda, Costa, y Aparisi [16] lo consideraron en su estudio “Supplying the energy demand in the chicken meat processing poultry with biogás”.

Conclusiones

En general se logró proponer un sistema de generación de biogás que está conformado por 3 etapas, tratamiento preliminar de plumas, sistema de biodigestión y sistema de generación de energía que cubrirá para el año 2025 un 22,23% la demanda de energía total y un 28,49% la demanda de energía de máquinas del centro de faenado avícola.

Los parámetros físico químicos de los residuos del centro de faenado avícola tienen factores idóneos tales como materia seca (76%), relación C/N (5-8), sólidos orgánicos (17%), sólidos volátiles (superior a 60%) y proteínas (91%) lo que hace viable su aprovechamiento en biogás. Además, el consumo actual de energía en el centro de faenado avícola es de 75,36 kWh al día del cual un 90% es consumido por el congelador, transportador y tanque escalador. Ello permitió identificar la energía que cubre el sistema de generación de energía diseñado.

Frente a opciones de biodigestores como el tradicional con cúpula de polietileno y el horizontal la opción de biodigestor más viable a instalar fue el de tipo chino o cúpula fija, pues al realizar el método de factores ponderados este resaltó en cuanto al bajo costo de inversión y mantenimiento, eficiencia de producción de biogás, larga vida útil y presión de biogás.

El diseño del sistema de generación de energía lo conforman un hidrolizador, cámara de carga, biodigestor, cámara de bioabono, tanque de almacenamiento, desulfurador y grupo electrógeno. Este sistema genera al día 34,74 m³ de biogás con una composición de 65,32% de CH₄ y 34,67% de CO₂. Además la obtención de energía se logró a través de un motor de una potencia de 3,5 kW que consume 2,1 m³biogás/h.

La inversión total de S/123 794,02 es favorable ya que el VAN (S/54 752,14) y el TIR (32%) son positivos, por lo que la inversión producirá ganancias. Así mismo, el tiempo de recuperación de la inversión fue de 1 año 11 meses y 29 días.

Recomendaciones

- Evaluar la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento del bioabono producido por el sistema de generación de energía.
- Analizar el diseño de un centro de faenado avícola autónomo a partir de lo propuesto en la investigación.
- Evaluar la posibilidad de proponer otra tecnología para la generación de biogás.
- Estudiar la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento de las plumas hidrolizadas como fuente secundaria de ingreso.

Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación, «Livestock and Poultry: World Markets and Trade,» Meat Market Review, 2018.
- [2] T. Perez, T. Carrasco y L. Nuñez, «Dinámica de las características físico-químicas de aguas de un sistema en el que convergen residuales pecuarios y urbanos,» *Cubana de Ciencia Agrícola*, vol. 39, n° 3, 2005.
- [3] A. Gonzales, «Efectos contaminantes de industrias agroalimentarias:mataderos e industrias carnicas,» *Anales de la Real Academia de Ciencias Veterinarias de Andalucía Oriental*, vol. 08, pp. 81-92.
- [4] Servicio Nacional de Sanidad Agraria , «servicios.senasa.gob.pe,» 20 10 2019. [En línea]. Available: https://servicios.senasa.gob.pe/SIGIAWeb/ino_establecimientosavicola.html. [Último acceso: 20 10 2019].
- [5] Ministerio del Ambiente , «Contaminación ambiental causada por los residuos sólidos,» Ministerio del Ambiente , Lima, 2014.
- [6] I. Baba, M. Banday, H. Khan, A. Khan y M. Untoo, «Economics of composting of poultry farm waste,» *Entomology and Zoology Studies*, vol. 4.
- [7] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, «Revisión del desarrollo avícola,» 2013.
- [8] Escuela Organización Industrial, «Los vertidos de los mataderos e industrias cárnicas,» Sevilla, 2008.
- [9] F. Jarabo, La energía de la biomasa, Madrid: S.A.P.T publicaciones técnicas, 1999.
- [10] D. Deublein y A. Steinhauser, Biogas from waste and renewable resources, Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co , 2008.
- [11] J. Hilbert , Manual para la producción de biogás, Buenos Aies : INTA, 2009.
- [12] R. Costa da Rocha, S. Beux y J. E. Parzinello, «Estudo do aproveitamento de resíduos avícola e lácteo na biodigestão anaeróbia: estabilidade do biofertilizante e biogás produzido,» *Regulamentacao Ambiental,desenvolvimento e inovacao*, vol. 10, n° 41, 2016.
- [13] T. Vivas, K. Hidalgo, C. Delgado y C. Banchón , «Evaluación en la producción de biogas con desechos avícolas y bovinos para generar energía eléctrica,» *DELLOS*, vol. 12, n° 34, pp. 95-136, 2019.
- [14] B. Aguilar Muela, Desarrollo e implementación de un biodigestor anaeróbico tipo rigido, Mexico, 2017.

- [15] N. F. Mantilla Suárez, «Biogás aprovechamiento energético de una granja ganadero-avícola,» Bucaramanga, 2017.
- [16] A. Ferrarez , D. Oliveira, A. Lacerda, J. Costa y F. Aparisi, «Supplying the energy demand in the chicken meat processing poultry with biogas,» *Ingeniería e Investigación*, vol. 36, n° 1, pp. 118-121, 2018.
- [17] J. H. Acosta Torres, «Propuesta de un sistema de tratamiento de efluentes para la obtención de agua reutilizable en el centro de beneficio avícola ANDY S.R.L.,» Chiclayo, 2016.
- [18] S. Menéndez y Y. Reasco, «Estudio del contenido energético renovable mediante tratamiento anaerobio mesofílico de residuales de camal y avícola del cantón naranjito,» Guayaquil, 2017.
- [19] MINAM, «cdn.www.gob.pe,» [En línea]. Available: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/311089/lmp_camales.pdf.
- [20] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, «Estudio para la evaluación socioeconómica y ambiental de tres prototipos de biodigestores en predios de pequeños productores lecheros,» Chile, 2009.
- [21] V. A. Shommer, B. M. Wenzel y D. J. Daroit, «Anaerobic co-digestion of swine manure and chicken feathers: Effects of manure maturation and microbial pretreatment of feathers on methane production,» *Renewable Energy*, vol. 152, pp. 1284-1291, 2020.
- [22] Y. Olaya Arboleda, Fundamentos para el diseño de biodigestores, Colombia , 2009.
- [23] R. Rodriguez, «Estudio y diseño preliminar de una instalación de cogeneración con biogás para una granja avícola autónoma,» Universidad de La laguna, La laguna, 2018.
- [24] M. Lantz, L. M. Svensson, L. Björnsson y P. Börjesson, «The prospects for an expansion of biogas systems in Sweden-Incentives, barriers and potentials,» *Energy Policy*, vol. 35, n° 3, pp. 1830-1843, 2007.
- [25] N. Delgado, «Propuesta de aprovechamiento de biogás obtenido a partir de estiércol de ganado vacuno para la implementación de un sistema de ventilación en la asociación de ganaderos de lambayeque,» Lambayeque, 2018.
- [26] C. A. Rojas, «Generación de biogás a partir de la cascarilla de arroz para reducir costos energéticos en la piladora La Merced S.R.L,» Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, 2018.
- [27] P. Kaparaju y J. Rintalca, Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells, Finland: Woodhead Publishing, 2013.

- [28] J. G. Lara, «Estudio de factibilidad para la conversión de biomasa en energía eléctrica y térmica en la Avícola Megaves Cia.ltda,» Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2019.
- [29] F. Almanza Mamani, «Construcción y evaluación de un biodigestor modelo chino mejorado para zonas andinas,» Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, 2011.
- [30] J. Hilbert, Manual para la producción de biogás., Buenos Aires : Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2003.
- [31] Unidad de Planeación Minero Energética, «<http://www.si3ea.gov.co>,» Marzo 2003. [En línea]. Available: http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/normalizacion/GUIA_PARA_LA_IMPLEMENTACION_DE_SISTEMAS_DE_PRODUCCION_DE_BIO.pdf. [Último acceso: 01 09 2020].
- [32] Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit (GTZ), Difusión de la tecnología del biogás en Colombia : documentación del proyecto, Cali: ULTRATEXTOS LTDA., 1987.
- [33] Caldera, «Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales de una industria avícola,» *Universidad de Zulia*, vol. 20, n° 4, pp. 409-416, 2010.
- [34] H. Owamah, M. Alfa y A. Onokwai, «Preliminary evaluation of the effect of chicken feather with no major pre-treatment on biogas production from horse dung,» *Environmental Nanotechnology*, vol. 14, pp. 1-20, 2020.
- [35] G. Forgacs, S. Alinezhad, A. Mirabdollah, . E. Feuk-Lagerstedt y I. S. Horváth, «Biological treatment of chicken feather waste for improved biogas production,» *Journal of Environmental Sciences*, vol. 23, n° 10, pp. 1747-1753, 2011.
- [36] Haarslev Processing Technology, «<https://es.haarslev.com/>,» Haarslev, 2021. [En línea]. Available: <https://es.haarslev.com/products/vertical-hydrolyzer/>. [Último acceso: 09 2021].
- [37] F. N. Yuliati y M. Sukma, «The Effects of Acidic and Alkaline Hydrolysis Process on some Physical and Chemical Properties of Broiler Chicken Feathers,» *Iranian Journal of applied Animal Science*, vol. 9, n° 3, pp. 529-540, 2019.
- [38] C. León, C. Rodríguez y G. Mendoza, «Diseño e implementación de una planta piloto de producción de Biogás, Biol y Biosol,» *Arnaldoa*, vol. 26, n° 3, p. 1023, 2019.
- [39] B. D. Grass, «<http://repositorio.uchile.cl>,» Enero 2013. [En línea]. Available: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/113095/cf-grass_bp.pdf?sequence=1. [Último acceso: 4 Julio 2018].

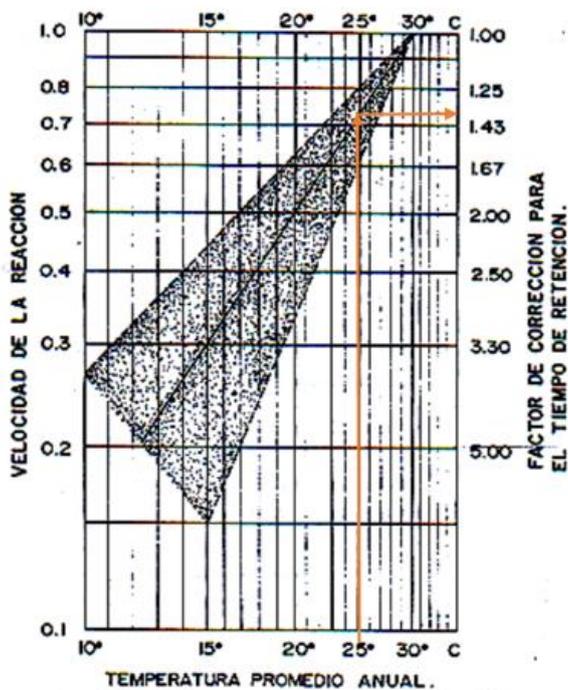
- [40] S. Montalvo y L. Guerrero, «Tratamiento anaeróbico de residuos,» Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 2003.
- [41] Aqualimpia Engineering E.K., «Aqualimpia.com,» [En línea]. Available: www.aqualimpia.com › download › QUE-ES-EL-BIOGAS. [Último acceso: 01 09 2020].
- [42] J. R. Laines Cenepa y J. A. Sosa Oliver, «Degradación anaerobia del contenido gástrico ruminal bovino para la obtención de biogás, en un biodigestor tipo cúpula,» *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, vol. 7, n° 1, pp. 57-65, 2013.
- [43] Superintendencia de Banca, Seguros y AFP, «sbs.gob.pe,» SBS, 2020. [En línea]. Available: <https://www.sbs.gob.pe/app/pp/EstadisticasSAEEPPortal/Paginas/TIActivaTipoCreditoEmpresa.aspx?tip=F>. [Último acceso: 12 10 2020].
- [44] Municipalidad de Chiclayo, «cgtch.gob.pe,» Municipalidad de Chiclayo, 2012. [En línea]. Available: http://www.cgtch.gob.pe/informacionTransparencia/normativas/archivos/CUIS_2012.pdf. [Último acceso: 12 10 2020].
- [45] C. Cachay Gonzales, «Proyecto de instalación de una planta industrial productora de compost en el distrito de monsefú para el aprovechamiento de residuos orgánicos domiciliarios,» Universidad Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, 2018.
- [46] Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, «<http://www2.osinerg.gob.pe/>,» OSINERG, 13 4 1993. [En línea]. Available: <http://www2.osinerg.gob.pe/Resoluciones/1993/01-1993.html>. [Último acceso: 12 10 2020].
- [47] Municipalidad Provincial de Chiclayo, «www.munichiclayo.gob.pe/,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.munichiclayo.gob.pe/Documentos/PIGARSChiclayo.pdf>. [Último acceso: 12 10 2020].
- [48] FAO, «[fao.org](http://www.fao.org/),» [En línea]. Available: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>.
- [49] N. Sunada, «Efluente de abatedouro avícola: processos de biodigestão anaeróbia e compostagem,» Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2011.
- [50] M. Feroldi, M. Urio, A. Araújo y P. Cremonez, «Geração de biogás a partir de efluentes de abatedouros,» *Journal of Agronomic Sciences*, vol. 3, pp. 130-148, 2014.
- [51] C. Martínez, L. Méndez y J. Flores, «Analysis of Von Mises Tense in Anaerobic Biodigesters Type Rigid Dome,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 27, n° 2, pp. 1-8, 2018.

Anexos

Anexo 1. Matriz de enfrentamiento para elección de biodigestor

Factores	Vida útil	Presión biogás	Fugas biogás	Tamaño de biodigestor	Mantenimiento	Requerimiento de espacio	Eficiencia del biogás	Inversión	Conteo	Ponderación
Vida útil		1	1	0	1	0	1	1	5	13%
Presión biogás	1		1	1	1	0	1	0	5	13%
Fugas biogás	1	1		0	1	0	1	0	4	11%
Tamaño de biodigestor	0	1	0		1	1	0	1	4	11%
Mantenimiento	1	1	1	1		1	1	1	7	18%
Requerimiento de espacio	0	0	0	1	1		1	0	3	8%
Eficiencia del biogás	1	1	1	0	1	1		1	6	16%
Inversión	1	0	0	1	1	0	1		4	11%
									38	100%

Anexo 2. Lectura de corrección para el tiempo de retención

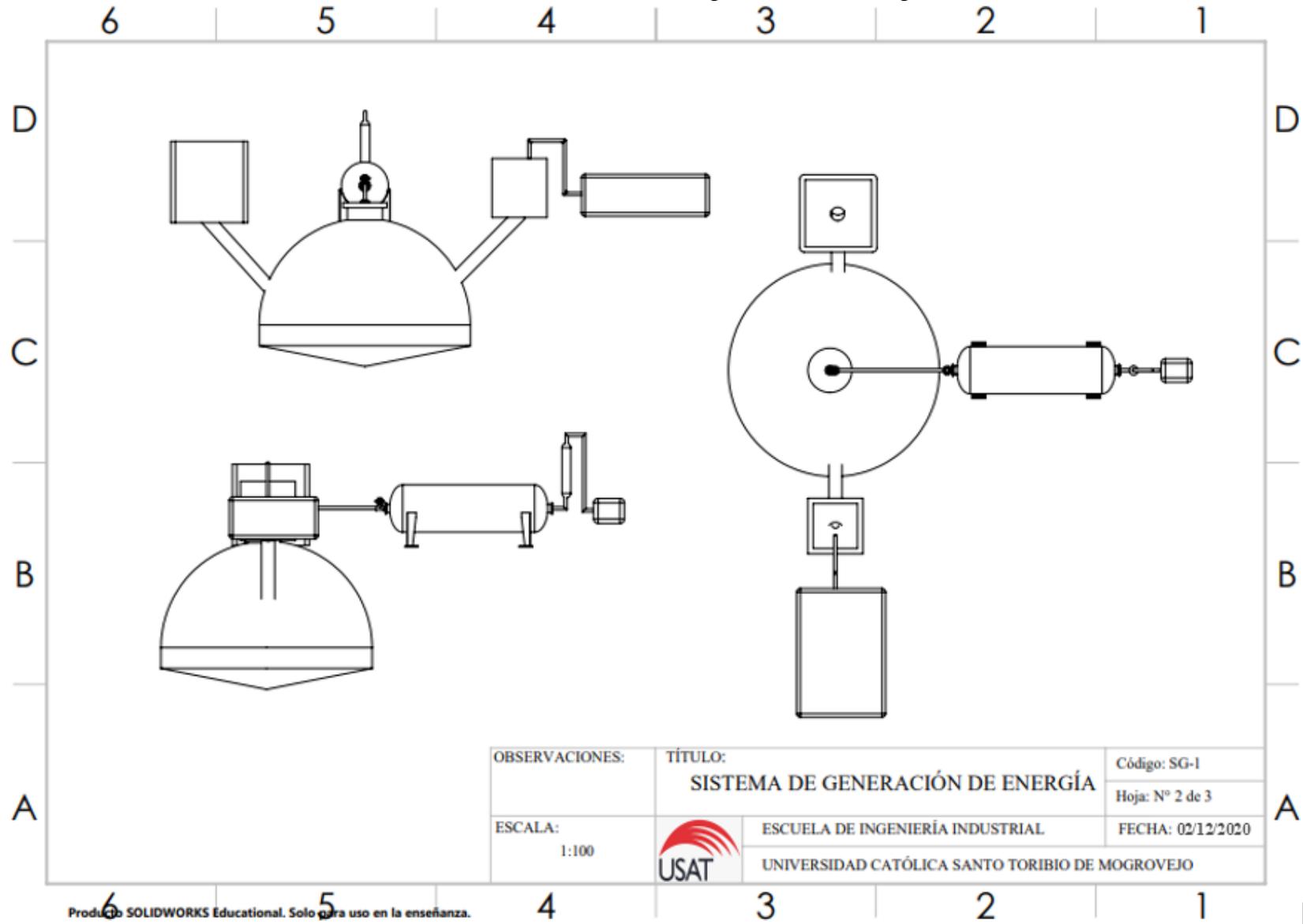


Anexo 3. Comparativa de tecnología de motores

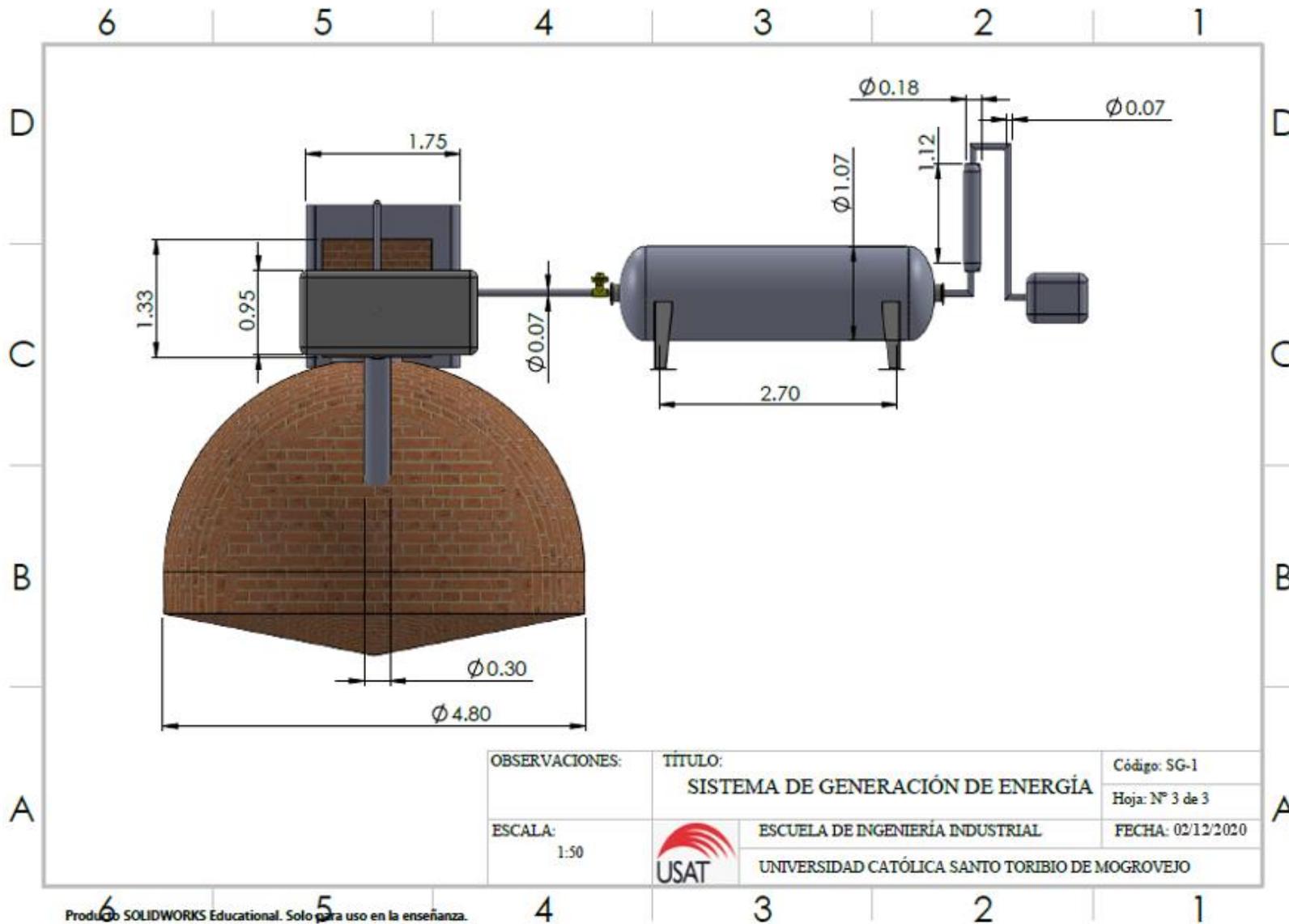
Parámetro	Motores alternativos	Turbina a gas	Micro-turbina	Motor Stirling	Pila de combustibles
Capacidad (kW)	20-6 000	3 500-15 000	30-300	<150	300- 1 500
Tamaño	Pequeña-Mediana	Grande	Pequeño	Pequeño	Pequeño
Eficiencia eléctrica (%)	30-40	25-40	25-30	30-40	40-45
Eficiencia térmica (%)	40-50	30-50	30-35	35-40	30-40
Eficiencia global del sistema (%)	70-80	70-75	55-65	65-80	75-80
Control relación potencia-calor	No es posible	Muy bien	Muy bien	Muy bien	Bien
Requisito de purificación de biogás	Medio	Medio	Medio	Medio bajo	Alto
Emisiones NOx	Alto 500-100 mg/Nm ³	Bajo de 25- 50 mg/Nm ³	Bajo	Muy bajo	Extremadamente bajo 3 mg/Nm ³
Costos de inversión	450-1 300	1 000- 1 700	700-1 400	1 500-1 700	3 400-4 500
Costos de operación y mantenimiento(\$/kWh)	0,01-0,02	0,005-0,1	0,008-0,015	0,003-0,005	0,003-0,01

Fuente: Kaparaju y Rintala, 2013 [27]; Tchbanouglos et al. citado por Lara [28]

Anexo 4. Vistas del Sistema de generación de energía



Anexo 5. Vista lateral del sistema de generación de energía



Anexo 6. Aplicación del Método Guerchet

Componentes	n	N	A	h	Se	Sg	Sc	Área total (m²)
Hidrolizador	1	3	5,9	1	5,9	18	14	37
Cámara de carga	1,0	4,0	1,0	1,0	1,0	4,1	3,0	8,1
Superficie de biodigestor	1,0	4,0	0,6	0,5	0,6	2,6	1,9	5,1
Cámara de bioabono	1,0	4,0	2,3	1,5	2,3	9,1	6,6	18,0
Tanque de almacenamiento de biogás	1,0	4,0	4,6	1,7	4,6	18,3	13,3	36,1
Desulfurador	1,0	4,0	0,0	1,2	0,0	0,1	0,1	0,3
Grupo electrógeno	1,0	4,0	0,4	0,6	0,4	1,5	1,1	2,9
Total								107,5

Anexo 7. Costos de producción en el año 1

	N°	Remuneración mensual (S/)	Beneficios mensuales (S/)	Sueldo total mensual (S/)	Total anual (S/)
Operario de pretratamiento de plumas	1	930,00	474,30	1 404,30	16 851,60
Operario del sistema	1	930,00	474,30	1 404,30	16 851,60
Operario de limpieza	2	70,00		70,00	1 680,00
Insumos					
Bidones para el bioabono					1 200,00
Mantenimiento					2 000,00
Capacitaciones					1 200,00
Total					39 783,20

Anexo 8. Sanciones

Infracción	Tipo de infracción	Sanción (UIT)
Por depositar en la vía pública los residuos sólidos desprovistos de bolsas plásticas o paquetes.	Grave	0,3
Por depositar los residuos sólidos fuera del horario de servicio de recolección establecido.	Grave	0,3
Por depositar residuos peligrosos y/o radiactivos, altamente peligrosos en la vía pública, para que sea retirado por personal municipal.	Grave	2
Por implementar lugares de disposición final de residuos sólidos, no autorizados.	Muy grave	1
Por transportar los residuos a sitios de disposición final no autorizados.	Muy grave	0,5
Por arrojar desechos en canales de regadío.	Muy grave	0,5
Por arrojar aguas servidas, de baldeo, desperdicios y basura en la vía pública.	Grave	0,15
Por almacenar, tratar, transportar, eliminar y realizar la disposición final de residuos sólidos, sin autorización o sin cumplir normas sanitarias vigentes.	Muy grave	0,2
Total		4,95

Fuente: Municipalidad de Chiclayo, 2012. [44]

Anexo 9. Propiedades de los sistemas de biodigestión

Propiedades	Chino	Tradicional con Cúpula de polietileno	Horizontal o Flexible
Descripción	Continuo; mezclado; almacenamiento de biogás integrado	Continuo; mezclado; fosa como digestor y cúpula de polietileno como almacenamiento de biogás	Continuo; tipo canal de fermentación; almacenamiento de biogás integrado
Tipo de sustrato	Excremento animal y residuos vegetales	Solo excremento animal	Solo excremento animal
Requerimiento de espacio	Bajo	Bajo	Alto
Ventajas	Bajo costo de construcción; Vida útil larga; Buen aislamiento	Muy bajo costo; Fácil de operar	Existencia de construcciones prefabricadas; Fácil de operar
Desventajas	Compleja impermeabilización del domo de biogás; Presión de biogás variable	Requiere suelos impermeables; Vida útil corta Vida útil corta,	Baja presión de biogás
Eficiencia para excremento bovino (m³ biogás/m³ digestor)	0,2 – 0,5	0,1 - 0,5	0,3 - 0,8
Costo aproximado de materiales (S/ /m³ de digestor)	337 - 718	270 – 538	270 – 1121
Costo específico total en Chile "llave en mano" (S/ /m³ de digestor)	670-1570	-	-

Fuente: ODEPA.2009. p.55 [20]