

Diseño de un sistema de digestión anaerobia para la obtención de biogás y bioabono en una granja avícola de la región caribe colombiana

Andrés Canchila Benítez¹, María Amador Sanabria¹, Carlos Jiménez Gómez¹, Pedro Arteta Chedraüy¹, Julián Yepes-Martínez¹  & Arturo González-Quiroga¹ 

¹ Universidad del Norte - Colombia



Para citaciones: Canchila Benítez, A., Amador Sanabria, M., Jiménez Gómez, C., Arteta Chedraüy, P., Yépez Martínez, J., & Gonzalez Quiroga, A. (2022). Diseño de un sistema de digestión anaerobia para la obtención de biogás y bioabono en una granja avícola de la región caribe colombiana. *Ing-NOVA*, 1(1), 43-65. <https://doi.org/10.32997/rin-2022-3727>

Recibido: 01 de agosto 2021

Revisado: 28 de octubre 2021

Aprobado: 08 de noviembre 2021

Autor de correspondencia:

Julián Yepes-Martínez

juliany@uninorte.edu.co

Editor: Miguel Ángel Mueses. Universidad de Cartagena-Colombia.

Copyright: © 2022. Canchila Benítez, A., Amador Sanabria, M., Jiménez Gómez, C., Arteta Chedraüy, P., Yépez Martínez, J., & Gonzalez Quiroga, A.. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> la cual permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando que el original, el autor y la fuente sean acreditados.



RESUMEN

La producción simultánea de biogás y bioabono genera oportunidades en el desarrollo de una economía circular para dar solución a los desafíos ambientales del sector pecuario. En este trabajo se realizó el diseño de un sistema de digestión anaerobia para la obtención de biogás y bioabono en una granja avícola ubicada en la región Caribe colombiana. Este sistema posee el diseño de un tanque de pretratamiento, biodigestor, almacenamiento de biogás y equipos de selección para la limpieza, transporte y separación de la biomasa de entrada, y biogás y biol generado. En concreto, el pretratamiento de la materia prima representa un factor innovador en la tecnología ya existente, ya que no se conoce hasta el momento un biodigestor instalado a partir de residuos secos de excretas de gallinas ponedoras a nivel mundial. En donde, con la ayuda de datos teóricos y el modelo matemático Chen-Hashimoto, se determinó que para una finca con 75000 gallinas ponedoras en la región Caribe colombiana la capacidad de producción promedio de biogás es de 430 m³ al día (equivalentes a 750 kWh/día), con producción promedio de bioabono líquido y sólido de 9800 y 695 L respectivamente, un dimensionamiento del sistema que cuenta con equipos de hasta tales como tanques de 23 m³ y 370 m³, bombas sumergibles con caudales de 3,2 m³/h, agitadores de 1 kW, un soplador de 250 W, filtros de humedad y azufre con capacidades de hasta 20 m³/h y centrifugadoras con capacidades de 0,5 m³/h. Por último, se estableció que se cumple con los requisitos de demanda energética de la finca estudiada y se establece que para la correcta implementación de un proyecto de esta magnitud posteriores investigaciones tienen que ser llevadas a cabo para dar soluciones apropiadas para cada etapa del sistema.

Palabras clave: Digestión anaerobia; Biodigestor; Biogás; Biofertilizante; Gallinaza.

Design of an anaerobic digestion system to obtain biogas and biofertilizer from a poultry farm in the Colombian Caribbean Region

ABSTRACT

The simultaneous production of biogas and biofertilizer generate opportunities in the development of a circular economy to tackle the environmental challenges of the

¹ Grupo de Investigación en Uso Racional de la Energía y Preservación del Medio Ambiente – UREMA, Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingeniería, Universidad del Norte, Km 5 vía Puerto Colombia, Área Metropolitana de Barranquilla, Colombia.

livestock industries. This work presents an anaerobic digestion system was designed to obtain biogas and biofertilizer in a poultry farm located in the Colombian Caribbean region. This system has the design of a pretreatment tank, biodigester, biogas storage and selection equipment for the cleaning, transport and separation of the input biomass, biogas and generated biol. In particular, the pre-treatment of the raw material represents an innovative factor in the existing technology, since there is no known biodigester installed so far from dry waste from laying hen manure worldwide. With the help of theoretical data and the Chen-Hashimoto mathematical model, it was determined that for a farm with 75,000 laying hens in the Colombian Caribbean region, the average biogas production capacity is 430 m³ per day (equivalent to 750 kWh/day), with an average production of liquid and solid biofertilizer of 9800 and 695 L respectively, a system dimensioning with equipment such as tanks of 23 m³ and 370 m³, submersible pumps with flow rates of 3.2 m³/h, agitators of 1 kW, a blower of 250 W, humidity and sulfur filters with capacities of up to 20 m³/h and centrifuges with capacities of 0.5 m³/h. Finally, it was established that the energy demand requirements of the studied farm are met and it is established that for the correct implementation of a project of this magnitude further research has to be carried out to provide appropriate solutions for each stage of the system.

Keywords: Anaerobic digestion; Biodigester; Biogas; Biofertilizer; Poultry manure.

1. Introducción

El biogás fue descubierto con evidencia científica por Jan Baptista Van Helmont en la primera mitad del siglo XVII, más específicamente en el año 1667 [1]. En 1906, Alemania, se construye la primera planta de producción de Biogás a partir de las aguas residuales del río Ruhr por el ingeniero alemán Karl Imhoff [2]. Asimismo, en Colombia a inicios del siglo XX la industria avícola se ratifica como actividad económica, según el gobierno colombiano, introduciendo gran cantidad de especies de gallinas ponedoras para la reproducción [2]. Seguidamente, en la década de 1980 se funda la federación nacional de avicultores (FENAVI) y es hasta el año 2017 donde la empresa Incubadora Santander S.A de la marca huevos Kikes instala el primer biodigester de aprovechamiento de la gallinaza en el país, marcando un modelo a seguir para pequeños, medianos y grandes productores de la industria avícola [3].

En este orden de ideas, mientras que Alemania cuenta actualmente con más de 5000 plantas de biogás (para diferentes tipos de residuos) instaladas a lo largo del país, en Colombia el potencial de energía desaprovechada, a partir de excretas de gallinas, es de 633 MW/h [2]. Por su parte, FENAVI aborda el tema del biogás como una alternativa desconocida y financieramente poco explorada, donde se invita a los productores de huevos a hacer uso de alternativas como el biogás para el manejo de la gallinaza [4].

Sin embargo, frente a esa cantidad de energía desaprovechada, empresas como Incubadora Santander S.A como se mencionó anteriormente, tratan de cerrar la brecha y aprovechar al máximo su ciclo de producción. Actualmente, cuentan con un biodigestor instalado en una de sus plantas de producción de Huevos Kikes, con el cual generan 0.8 MW de energía eléctrica y tienen una proyección total de cinco biodigestores capaces de generar alrededor de 4.6 MW en energía eléctrica [5]. Por otra parte, granjas de pequeña escala, en este caso de ganado vacuno tienen implementados biodigestores familiares con bolsas de polietileno lo cual les ha hecho reducir en hasta un 80% los costos asociados a compra de fertilizantes y gas natural [6]. Igualmente, empresas como la encargada del relleno sanitario Doña Juana en Bogotá, azúcar Manuelita, Bavaria, Fazenda entre otras, hacen uso y aprovechan los residuos asociados a sus procesos productivos para la generación de biogás contribuyendo a la disminución del impacto de su huella de carbono [5].

En el departamento del Atlántico, más específicamente en el municipio de Polonuevo, se encuentra ubicada la granja Cunardo perteneciente a la empresa Inversiones Hermanos De Silvestri S.A.S. Su actividad principal es la producción de albahaca tipo exportación, aunque adicionalmente cuentan con ganado bovino y gallinas ponedoras [7]. Por consiguiente, la empresa en su línea de avicultura es consciente de la oportunidad que tiene en el aprovechamiento de residuos asociados a su producción de huevos para la comercialización y el consumo de los colombianos, mostrando interés en la producción de energía a partir de la generación de Biogás, contribuyendo especialmente a los objetivos de desarrollo sostenibles (ODS) número 7 y 13. Estos son, garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna, y adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, respectivamente [8].

Por las razones comentadas anteriormente, esta investigación tiene como objetivo el diseño de un sistema de digestión anaerobia para el aprovechamiento de los residuos asociados a la actividad avícola llevada a cabo en la finca Cunardo, ubicada en el departamento del Atlántico, Colombia. En donde, luego de una exhaustiva revisión de la literatura, se modeló la producción de biogás y el potencial energético producido en la finca, junto con el desarrollo del diseño de la propuesta a presentar.

2. Metodología

En consecuencia de lo anterior, se aplicaron métodos de análisis de diagnóstico conceptual sesgados por las condiciones ambientales y productivas del contexto geográfico estudiado, que facilitaron el análisis de parámetros de dimensionamiento y diseño del sistema. El procedimiento

metodológico empleado para realizar el diseño de un biodigestor se rige a partir de etapas, las cuales se desarrollan en el siguiente orden:

- Análisis de la naturaleza y composición de la biomasa de forma conceptual en base a información encontrada en la literatura.
- Identificación de condiciones del entorno/medio ambientales y parámetros óptimos de la biomasa.
- Estimación de producción de biomasa requerida para cubrir la demanda energética mensual de la granja, por medio del modelamiento de datos con el sistema de Chen-Hashimoto.
- Estimación de dimensionamiento de flujos de trabajo y equipos que componen el sistema de tratamiento.
- Desarrollo de planos de diseño del sistema de biodigestión anaerobia bajo los parámetros previamente calculados.

El método analítico implementado para estimar la cantidad de biomasa necesaria ante la demanda energética de la granja Cunardo, y definir el comportamiento del sistema a diseñar, fue el modelo de Chen-Hashimoto, Este modelo matemático, a base de balances de masa en biodigestores de mezcla completa y continuos, busca definir el comportamiento y rendimiento de microorganismos del proceso de digestión anaerobia, con énfasis en el tratamiento de residuos ganaderos. El balance de masa de la biomasa y el sustrato se define por las siguientes condiciones y ecuaciones: densidad constante, masa de entrada no posee microorganismos y se desprecia la muerte de microorganismos [9].

	Balance microbiano		Estado estacionario
Biomasa	$\frac{d(XV_r)}{dt} = -QX + r_x V_r$ (A)		$\mu = \frac{1}{\theta}$ (C)
	$r_x = \mu X$ (B)		
Sustrato	$\frac{d(SV_r)}{dt} = Q(S_o - S) - r_s V_r$ (D)		$r_s = \frac{S_o - S}{\theta}$ (E)

Por otro lado, el modelo de Chen-Hashimoto hace uso de la ecuación cinética (F), la cual define la velocidad específica de crecimiento de microorganismos.

$$\mu = \frac{\mu_{max} \cdot S}{\beta \cdot X + S} \quad (F)$$

De forma seguida, el crecimiento microbiano se asocia con el consumo de sustrato por medio del rendimiento de biomasa por sustrato consumido:

$$Y_{x,s} = \frac{\Delta X}{\Delta S} \rightarrow \frac{dX}{dt} = Y_{x,s} \frac{dS}{dt} - bX \rightarrow r_x = Y_{x,s} r_s \rightarrow r_s = \frac{r_x}{Y_{x,s}} \quad (G)$$

Igualando las ecuaciones (E) y (G), y reemplazando la Ecuación (C) en (G) se obtiene concentración de biomasa, tal como se muestra en la Ecuación (H)

$$X = Y_{x,s} \cdot (S_o - S) \quad (H)$$

Reemplazando la Ecuación (H) en (F) se obtiene la **concentración del sustrato en el digestor**:

$$S = \frac{\beta \cdot Y_{x,s}}{\theta \cdot \mu_{max} + \beta \cdot Y_{x,s} - 1} * S_o \rightarrow \beta \cdot Y_{x,s} = K \rightarrow S = \frac{K}{\theta \cdot \mu_{max} + K - 1} * S_o \quad (I)$$

La constante K se conoce como **constante adimensional de inhibición de Chen-Hashimoto** y está definida por la Ecuación (J), así mismo, en la Ecuación (K) se presenta la expresión que determina el valor de la **tasa de crecimiento máxima**:

$$K = 0.6 + 0.021 \cdot e^{0.05 \cdot S_o} \quad (J)$$

$$\mu_{max} = 0.013T - 0.129 \quad (K)$$

Con base a lo anterior, en la Ecuación (L) se define la **eficiencia en la eliminación de sustrato**:

$$E = 1 - \frac{S}{S_o} \quad (L)$$

En la Ecuación (M) se define **producción de metano/biogás referido al sustrato**:

$$P_c = G_o \cdot E \quad (M)$$

Finalmente, la Ecuación (N) define el ultimo parámetro del modelo el cual corresponde a la **producción de metano/biogás por unidad de tiempo y volumen del reactor**:

$$P_v = \frac{Q}{V} \cdot S_o \cdot G_o \cdot E \quad (N)$$

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización de la biomasa

En la Tabla 1 se presentan las propiedades fisicoquímicas y especificaciones de la gallinaza de ponedoras. Por lo general, las instalaciones de pollos de engorde se encaman con materiales que tienen un contenido de humedad inferior al 10%, en este caso los residuos de tipo gallinaza poseen un 18% de impurezas (cama de galpones, plumas, restos de comida). En condiciones normales, la humedad de la cama al final de la manada puede fluctuar entre el 20 y el 25% [10]. Así mismo, el final de la manada en la granja Cunardo

ocurre cada 90 semanas, es decir, cada 20 meses se realiza la recolección de los residuos de gallinaza en los galpones, esta permanece retenida con demás residuos para luego ser utilizada en el proceso de digestión; dicho periodo de retención permite considerar los residuos como biomasa seca ($ST > 20\%$), por lo que, siendo conservadores, se asumió una humedad del 15% ($ST = 85\%$) [11].

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas y especificaciones de gallinaza de ponedoras [12].

Propiedades fisicoquímicas de la biomasa	
Sólidos totales (ST)	85%
Sólidos Volátiles (SV)	83.95%
Densidad	350 kg/ m ³
Humedad	15%
Cantidad de impurezas	18%

Para un óptimo proceso de digestión anaerobia se recomienda que la mezcla en la alimentación del biodigestor tenga un porcentaje de humedad alrededor del 88% y 93% ($12\% < ST < 7\%$); teniendo en cuenta que la humedad de los residuos es tan solo del 15%, se debe adicionar agua hasta obtener un porcentaje de humedad dentro de los rangos óptimos. El agua usada en esta parte del proceso tiene como procedencia uno de los pozos internos que posee la granja, el cual se comentó con la empresa encargada y manifestó que no representaba un problema a su cotidianidad ni abastecimiento del servicio. La relación biomasa-agua consumida en la mezcla es de 1:7, es decir, por cada metro cúbico de biomasa que entra al biodigestor, se deben añadir siete de agua. La relación biomasa-agua escogida permite que la mezcla obtenga un porcentaje de humedad de 89.37%, el cual se encuentra dentro de los rangos óptimos.

3.2 Especificaciones del modelo

Para el diseño y dimensionamiento de este tipo de sistemas es importante hacer uso de modelos matemáticos que permitan realizar una estimación del comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios. Actualmente dentro de la literatura se encuentran diferentes modelos que son aplicados al diseño de biodigestores, uno de ellos es el modelo de Chen y Hashimoto, el cual fue desarrollado para estimar el comportamiento de biodigestores alimentados por residuos ganaderos [13], [14]. Este modelo matemático permite determinar los siguientes parámetros:

- Concentración del sustrato en el digestor
- Eficiencia en la eliminación del sustrato

- Producción de metano/biogás referido al sustrato
- Producción de metano/biogás por unidad de tiempo y volumen del reactor

3.3 Parámetros de entrada

Para desarrollar exitosamente el modelo matemático de Chen y Hashimoto se deben conocer los siguientes parámetros de entrada:

- Temperatura del proceso.
- Alimentación diaria del proceso de digestión.
- Concentración inicial de sustrato del digestor.
- Producción de CH₄ por unidad de materia orgánica degradada.
- Producción de biogás por unidad de materia orgánica degradada.

En primer lugar, se debe tener en cuenta que los procesos de digestión anaerobia pueden darse en tres rangos de temperatura: Psicrófilico ($T < 20^{\circ}\text{C}$), Mesófilico ($30^{\circ}\text{C} < T < 40^{\circ}\text{C}$) y Termófilico ($50^{\circ}\text{C} < T < 70^{\circ}\text{C}$); a mayor temperatura, mayor producción de biogás, sin embargo, este aumento puede generar problemas en la estabilidad del proceso, por ende, se recomienda trabajar siempre dentro de los rangos mesofílicos. Con el fin aprovechar las condiciones climáticas de Colombia, específicamente la región caribe, no se hizo uso de intercambiadores de calor para el acondicionamiento del sustrato.

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo matemático se desarrolló para tres casos de estudios diferentes: Digestión a 25°C , Digestión a 30°C y Digestión a 35°C (todas dentro del rango recomendado), correspondientes a las variaciones de temperatura que se observan dentro de la región caribe; así mismo, el análisis de estos escenarios facilita visualizar el comportamiento del digestor ante cambios en la temperatura del sustrato y presentar un rango de los resultados que se pueden obtener.

Por otro lado, para la obtención de la alimentación diaria del proceso de digestión se tuvo en cuenta el flujo másico total de los residuos de la granja, las propiedades fisicoquímicas de estos residuos y la relación biomasa:agua a utilizar. El flujo másico total está dado por la Ecuación 1.

$$m_T = m_{\text{excretas}} + m_{\text{impurezas}} + m_{\text{camas}} \quad (1)$$

Debido a que la granja no posee un recuento del flujo másico referente a las impurezas, se asumió que la cantidad de impurezas representa un porcentaje muy pequeño del flujo másico total. Teniendo en cuenta que al final de los 90 días la granja genera 369864 kg de gallinaza y que el 18% corresponde a

material de las camas, por medio de la Ecuación 1 se obtiene el flujo másico de excretas.

$$m_{excretas} = 481.34 \text{ kg/d}$$

Para hallar el flujo volumétrico de las excretas se hace uso de la Ecuación 2.

$$Q_e = \frac{m_{excretas}}{\rho} \quad (2)$$

$$Q_e = 1.375 \text{ m}^3/\text{d}$$

Para determinar la alimentación diaria de residuos al digestor (Q) se tuvo en cuenta que por cada 1 m^3 de biomasa que entre al biodigestor, se deben añadir 7 m^3 de agua, dando como resultado una alimentación diaria de 11 m^3 . La concentración inicial de sustrato del digestor hace referencia a la cantidad en kg de sólidos volátiles que se encuentran en 1 m^3 de mezcla. Teniendo en cuenta que la biomasa corresponde al 12.5% de la mezcla y que alrededor del 71.4% de la biomasa equivale a los sólidos volátiles, se puede afirmar que en 1 m^3 de agua hay 89.20 kg de sólidos volátiles, cabe resaltar que el agua en condiciones puras no posee sólidos volátiles.

Finalmente, para la producción de CH_4 por unidad de materia orgánica degradada se utilizaron valores conceptuales encontrados en la literatura, estos se encuentran alrededor de $0.39 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ [15]. Se asume que el biogás producido es 65% metano por ende la producción de biogás por unidad de materia orgánica degradada es de $0.6 \text{ m}^3 \text{ Biogás}/\text{kg SV}$. Otra opción más exacta para la obtención de este parámetro es mediante el diseño de un biodigestor a escala laboratorio con la implementación del mismo tipo de mezcla, sin embargo, el valor conceptual nos ofrece una buena estimación del valor real. El resumen de los valores calculados se encuentra en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de entrada a utilizar en el modelo matemático.

Parámetro	Unidad	Valor
Temperatura del proceso	°C	25 - 35
Alimentación diaria del proceso de digestión (Q)	m^3/d	11
Concentración inicial de sustrato del digestor (S_0)	$\text{kg SV}/\text{m}^3$	89.20
Prod. CH_4 por unidad de materia orgánica degradada (G_0)	$\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$	0.39
Prod. biogás por unidad de materia orgánica degradada (G_0)	$\text{m}^3 \text{ Biogás}/\text{kg SV}$	0.6

3.4 Aplicación del modelo

Para el desarrollo del modelo matemático se usaron las herramientas que ofrece Excel, allí se digitaron cada una de las ecuaciones presentadas en la metodología en función del tiempo de retención hidráulico. Reemplazando los parámetros de entrada en cada una de las ecuaciones, se simuló el modelo para un tiempo de retención entre 0 a 40 días; este procedimiento se realizó para cada uno de los escenarios (Digestión a 25 °C, Digestión a 30 °C y Digestión a 35 °C). Con base a dicha simulación, se hizo una representación gráfica de la eficiencia de depuración y la producción volumétrica de biogás en función del tiempo de retención hidráulico, con el fin de ver el comportamiento del sustrato dentro del digestor, el cual permite identificar el tiempo de retención hidráulico óptimo para el diseño del sistema.

En la Figura 1 se puede observar la producción volumétrica de biogás en función del tiempo de retención hidráulico. Nótese que, a mayor temperatura de sustrato, mayor producción de biogás. Por otro lado, la mayor producción diaria de biogás se presentará entre los días 8 y 13.

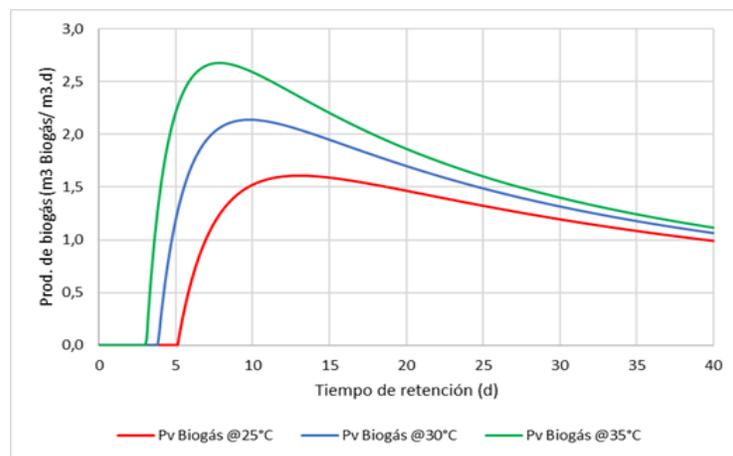


Figura 1. Producción volumétrica de biogás en función del tiempo de retención hidráulico.

En la Figura 2 se detalla la eficiencia de depuración en función del tiempo de retención hidráulico, esta grafica presenta una tendencia asintótica donde la máxima depuración ocurre en tiempo infinito.

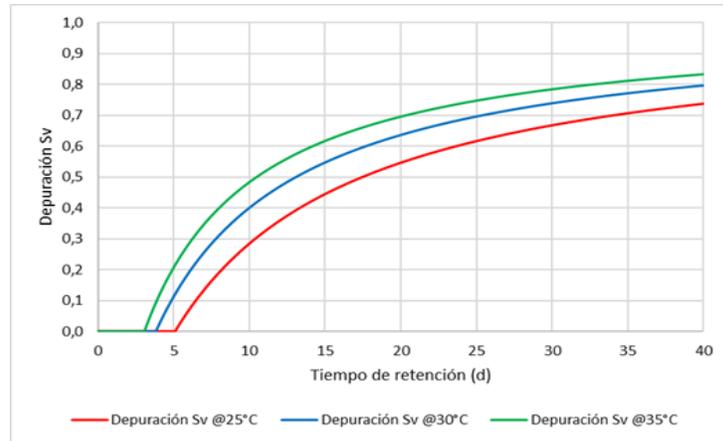


Figura 2. Eficiencia de depuración (eliminación de SV) en función del tiempo de retención hidráulico.

De las gráficas anteriormente mencionadas se puede concluir que existe un tiempo muerto en el cual las bacterias no producen biogás, este puede variar según la temperatura entre 3 a 5 días. También se debe resaltar que la máxima producción de biogás diaria no concuerda con la máxima eficiencia de depuración, por lo tanto, a la hora de diseñar se debe buscar el tiempo de retención óptimo para aprovechar ambos factores y sin exceder los costos de fabricación, ya que a mayor tiempo de retención mayor volumen útil del digestor.

Dentro de las especificaciones del proyecto se tiene que la mínima eficiencia de depuración del digestor debe ser de 65%, por ende, el tiempo de retención hidráulico será de 28 días, esto se puede observar en la figura 3, además la variabilidad en la producción de biogás para este tiempo es baja.

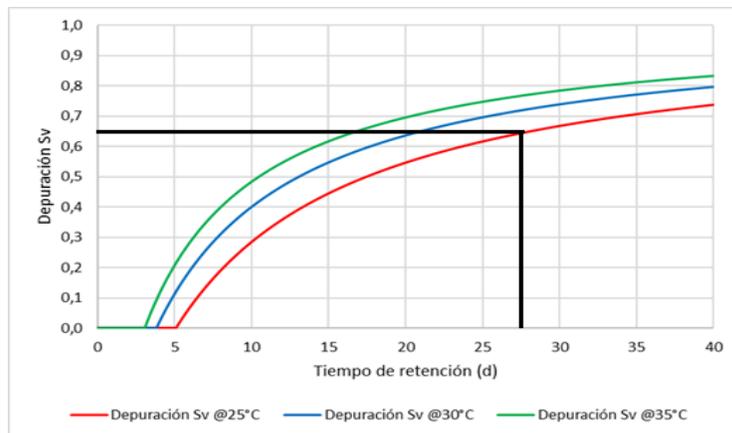


Figura 3. Selección del tiempo de retención hidráulico por medio de las especificaciones del sistema.

Una vez obtenido el tiempo de retención hidráulico óptimo para el proceso, se volvió a simular el modelo en ese instante de tiempo y se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados obtenidos del modelo Chen-Hashimoto para los tres casos de estudios.

Parámetro	Digestión 25 °C	Digestión 30 °C	Digestión 35 °C
Tiempo muerto (días)	5	4	3
Concentración de sustrato del digestor (kg SV/m ³)	31.213	24.702	20.438
Eficiencia en la eliminación del sustrato	0.650	0.723	0.771
Producción de metano por unidad de tiempo y volumen del reactor (m ³ CH ₄ /m ³ .d)	0.808	0.898	0.958
Producción de biogás por unidad de tiempo y volumen del reactor (m ³ Biogás/m ³ .d)	1.243	1.382	1.473
Producción de metano referida al sustrato (m ³ CH ₄ /kg SV)	0.254	0.282	0.301
Producción de biogás referida al sustrato (m ³ Biogás/kg SV)	0.390	0.434	0.463

Con base a los parámetros hallados podemos determinar el volumen útil del digestor, la producción diaria de metano y la producción diaria de biogás. Para el volumen útil del biodigestor se utiliza la Ecuación 3.

$$V = Q \cdot \theta = 308 \text{ m}^3 \quad (3)$$

Reemplazando los parámetros hallados en la Tabla 3 en la Ecuación 4 se obtienen los resultados de la Tabla 4, aquí se muestra la producción diaria de metano y biogás en función de la temperatura.

$$Q_{CH_4/Biogás} = Q \cdot S_o \cdot P_c [CH_4/Biogás] \quad (4)$$

Tabla 4. Producción diaria de Metano y Biogás en función de la temperatura del sistema.

Temperatura de digestión (°C)	Producción diaria de Metano (m ³ CH ₄ /d)	Producción diaria de Biogás (m ³ Biogás/d)
25	249.220	383.415
30	277.208	426.474

35	295.534	454.668
----	---------	---------

De esta manera, se obtiene una cantidad de biogás producido por unidad de mezcla de 41 L/kg (con un volumen del biodigestor de 308000 L). Con fines comparativos se realizó una búsqueda de un biodigestor que tuviera características similares y que haya sido ensayado con excreta de gallina, este obtuvo aproximadamente una cantidad de biogás producido por unidad de mezcla de 40 L/kg (con un volumen del biodigestor de 34000 L). Se aprecia que los valores son muy similares y la diferencia puede deberse a factores como: Propiedades fisicoquímicas de la mezcla, temperatura, tiempo de retención u otros [16].

3.5 Composición del digestato

Teóricamente la cantidad de digestato producido está definido como la diferencia entre el flujo másico de entrada al digestor y el flujo másico de biogás producido dentro del digestor, tal como se muestra en la Ecuación 5.

$$m_{\text{digestato}} = m_{\text{alimentación}} - m_{\text{biogás}} \quad (5)$$

Debido a que la mezcla que se introduce a la entrada del digestor tiene una composición de 87.5% agua se asumió que la densidad del fluido es 1000 kg/m³. Por otro lado, el biogás posee una densidad de aproximadamente 1.2 kg/m³ [17]. En la Tabla 5 se observa la cantidad de digestato producido diario en función de la temperatura del sistema.

Tabla 5. Flujo másico del digestato en función de la temperatura del sistema de digestión.

Temperatura de digestión (°C)	Flujo másico del digestato (kg/d)
25	10539.902
30	10488.231
35	10454.398

Por medio de la Ecuación 6 se calculó la cantidad de solidos volátiles por tonelada de digestato, para esto es importante tener en cuenta la concentración de SV en el digestor calculada dentro del modelo de Chen-Hashimoto.

$$SV_{\text{digestato}} = \frac{S_o \cdot Q}{m_{\text{digestato}}} \quad (6)$$

En la Tabla 6 se observa la concentración de sólidos volátiles del digestato en función de la temperatura del sistema de digestión.

Tabla 6. Concentración de sólidos volátiles del digestato en función de la temperatura del sistema de digestión.

Temperatura de digestión (°C)	Concentración de sólidos volátiles del digestato (kg SV/t digestato)
25	32.576
30	25.907
35	21.505

Por otro lado, el flujo másico de sólidos totales del digestato se determina mediante la diferencia entre el flujo másico del digestato y el flujo másico del agua que posee el digestato, tal como se muestra en la Ecuación 7.

$$m_{ST \text{ digestato}} = m_{\text{digestato}} - m_{H_2O \text{ digestato}} \quad (7)$$

Se debe destacar que al flujo másico del agua que contiene el digestato se le debe restar el agua que se va saturada en el biogás. Para calcular el agua saturada se utiliza la Ecuación 8 y se asume que el biogás tiene un comportamiento similar al aire a las temperaturas del sistema, por lo tanto, en la Tabla 7 se muestra la humedad absoluta a saturación por aire para cada una de las temperaturas estudiadas.

Tabla 7. Humedad absoluta a saturación por aire en función de la temperatura del sistema de digestión.

Temperatura de digestión (°C)	Humedad absoluta (g H ₂ O/Kg aire)
25	20.075
30	27.182
35	36.561

$$m_{H_2O \text{ saturada}} = Q_{\text{Biogás}} \cdot X \quad (8)$$

En la Tabla 8 se determina el flujo másico de agua saturada que se va con el biogás en función de la temperatura del sistema de digestión.

Tabla 8. Flujo másico de agua saturada que permanece en el biogás en función de la temperatura del sistema de digestión.

Temperatura de digestión (°C)	Flujo másico de agua saturada que se va con el biogás (kg/d)
25	9.236
30	13.911
35	19.948

El flujo másico de agua dentro del digestato está definido por la Ecuación 9. En la Tabla 9 se observan los resultados obtenidos de este parámetro en función de las temperaturas estudiadas.

$$m_{H_2O_{digestato}} = (m_{alimentacion} - ST_{mezcla} \cdot m_{alimentacion}) - m_{H_2O_{saturada}} \quad (9)$$

Tabla 9. Flujo másico de agua que posee el digestato en función de la temperatura del sistema de digestión.

Temperatura de digestión (°C)	Flujo másico del agua que contiene el digestato (kg/d)
25	9822.014
30	9817.339
35	9811.302

Reemplazando todos los valores calculados dentro de la Ecuación 5, se obtiene el flujo másico de sólidos totales del digestato, los resultados se observan en la Tabla 10.

Tabla 10. Flujo másico de sólidos totales que posee el digestato en función de la temperatura del sistema de digestión.

Temperatura de digestión (°C)	Flujo másico de sólidos totales que contiene el digestor (kg ST/d)
25	717.888
30	670.892
35	643.096

Finalmente, por medio de la Ecuación 8 se obtiene la concentración de sólidos totales que posee el digestato.

$$ST_{digestato} = \frac{m_{STdigestato}}{m_{digestato}} \quad (10)$$

En la Tabla 11 se observa la concentración de sólidos totales del digestato en función de la temperatura del sistema de digestión.

Tabla 11. Concentración de sólidos volátiles del digestato en función de la temperatura del sistema de digestión.

Temperatura de digestión (°C)	Concentración de sólidos totales del digestato (kg ST/t digestato)
25	68.111
30	63.966
35	61.514

3.6 Diagrama de flujo del proceso

Respecto al diagrama de flujo del sistema, en primera instancia la biomasa entra al pre-digestor y se mezcla con agua en su interior. Seguido a esto, la mezcla entra al biodigestor y al producirse biogás se realiza la deshumidificación y la desulfuración en sus equipos correspondientes. Por otra parte, hasta que el biodigestor no esté en su estado de operación estable, el biogás se debe quemar en una antorcha. El otro producto que sale del biodigestor es el digestato, el cual entra en un separador centrífugo para obtener el bioabono líquido y sólido por separado. El diagrama de flujo anteriormente descrito se puede apreciar en la Figura 4.

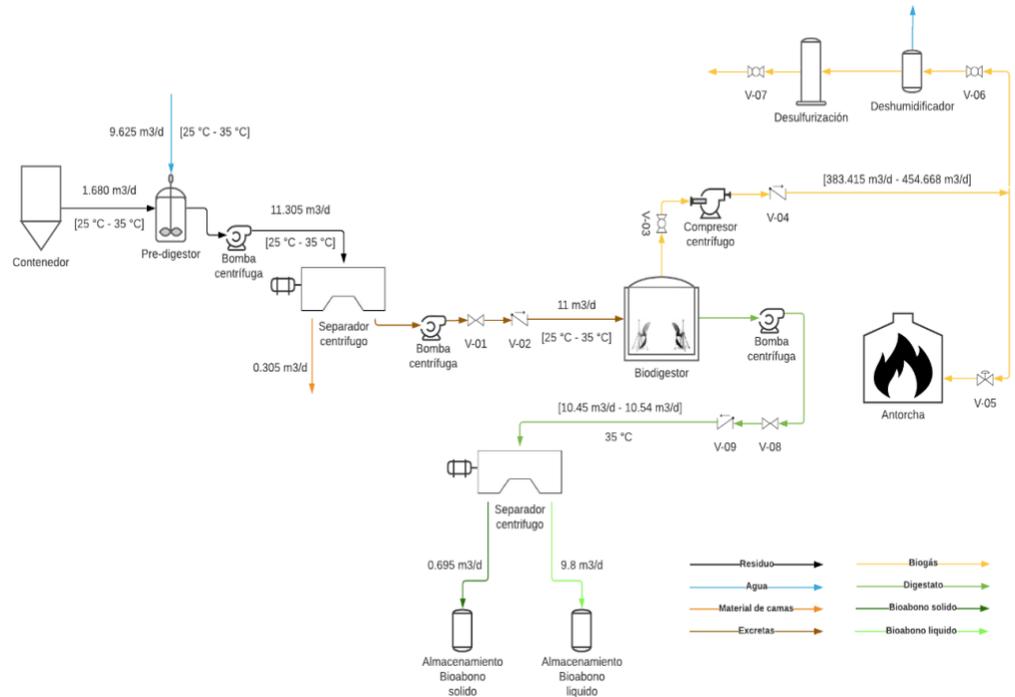


Figura 4. Diagrama de flujo del sistema.

3.7 Equipos y etapas del proceso

Por otro lado, el sistema cuenta con siete equipos principales para el correcto funcionamiento de la planta y la producción de biogás. En orden de ubicación, se tienen los siguientes equipos:

- Un tanque de pretratamiento, donde se mezclan las excretas con agua.
- Una centrifugadora capaz de soportar el flujo de entrada de biomasa y separar la mezcla de gallinaza y agua de las impurezas.
- Un biodigestor semicontinuo, el cual posee un aislamiento de vidrio espuma y donde se lleva a cabo el proceso de digestión anaerobia.
- Un gasómetro doble membrana interno, donde se almacenará el biogás producido.
- Una trampa de humedad ubicada a la salida del biodigestor, con el fin de retirar el vapor de agua presente en el biogás.
- Un filtro de desulfuración, donde se le retira el sulfuro de hidrógeno al biogás producido.
- Una centrifugadora tipo decanter para separar el digestato líquido del sólido.

3.8 Dimensionamiento del sistema

Para realizar el dimensionamiento se tuvo en cuenta las etapas más importantes del diseño, que son el tanque de pretratamiento, biodigestor y

gasómetro. Entre los aspectos más importantes, se encuentra que el sistema de digestión es semicontinuo y que trabaja durante 4h seguidas al día. Asimismo, se calcularon los volúmenes útiles de estos tres componentes para obtener de forma correcta y eficiente la producción de biogás, quedando de esta manera:

- El tanque de mezclado cuenta con un volumen útil de aproximadamente 23 m³, altura de 3.5 m y diámetro de 3 m. En la Tabla 12 se muestra un resumen de las especificaciones del tanque de mezclado.

Tabla 12. Resumen de especificaciones de tanque de mezclado.

Materiales de construcción	Cemento o acero
Geometría	Cilíndrico overground
Diámetro	3 m
Altura	3.5 m
Volumen útil	22.61 m ³
Volumen del tanque	25 m ³

- El digestor tiene un volumen útil de 308 m³, presentando un tiempo de retención de 28 días, con altura de 5 m y diámetro de 11 m. En la Tabla 13 se muestra un resumen de las especificaciones del digestor.

Tabla 13. Resumen de especificaciones del digestor.

Materiales de construcción	Cemento o acero
Geometría	Cilíndrico overground
Diámetro	10 m
Altura	4.7 m
Volumen útil	308 m ³
Volumen del digestor	370 m ³
Aislamiento	Vidrio espuma

Esesor del aislamiento	0.1 m
------------------------	-------

- El gasómetro deberá ser capaz de almacenar entre 4 a 6 h de producción de biogás, por lo que el volumen útil es de 114 m³ con diámetro de 10 m y altura de 3.3 m. En la Tabla 14 se observan las especificaciones dadas por el fabricante.

Tabla 14. Especificaciones del gasómetro seleccionado.

Fabricante	Zorg Biogas
Diámetro	10 m
Geometría	Cúpula en forma de 1/3 D
Altura	3.33 m
Volumen utilizable	130 m ³

Por otro lado, para el transporte de los fluidos, se seleccionaron equipos como agitadores, válvulas, bombas, sopladores y tuberías. Finalmente, los equipos son los siguientes:

- Un agitador tipo hélice de alta velocidad en el tanque de pretratamiento.
- Una bomba sumergible de bajo caudal y bajas presiones en el tanque de pretratamiento.
- Una bomba externa para bombear la excreta al biodigestor.
- Una válvula de compuerta y otra de antirretorno.
- Dentro del biodigestor se encuentran dos agitadores sumergibles de bajas velocidades para evitar la ruptura de enlaces del proceso de digestión anaerobia.
- Un soplador a la salida del biodigestor para transportar el biogás producido, en un sistema con cuatro válvulas de control y una de antirretorno.
- Dos equipos de limpieza de biogás que eliminarán la humedad y el azufre presentes en el biogás producido.
- Una bomba sumergible dentro del biodigestor, válvulas de arranque y antirretorno.

En la Figura 5, se puede apreciar el plano explosionado de la planta, con todos los equipos de cada etapa del proceso.

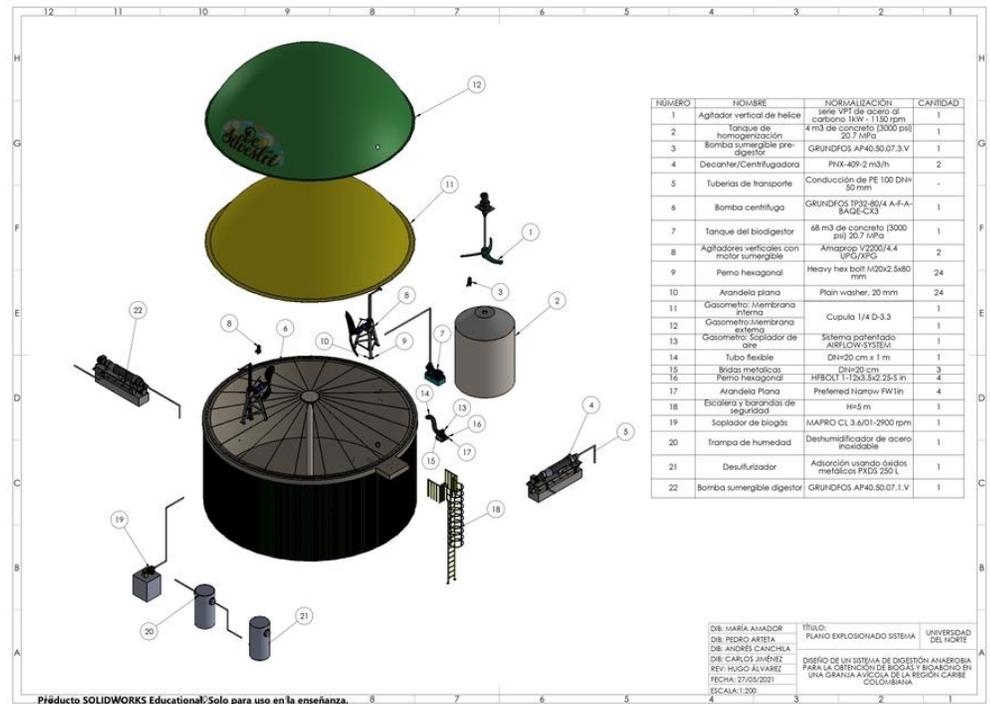


Figura 5. Plano básico del sistema diseñado con lista de componentes (BOM).

Por otro lado, en la Figura 6 y Figura 7 se puede observar el plano a detalle de los componentes y el plano a detalle del biodigestor respectivamente.

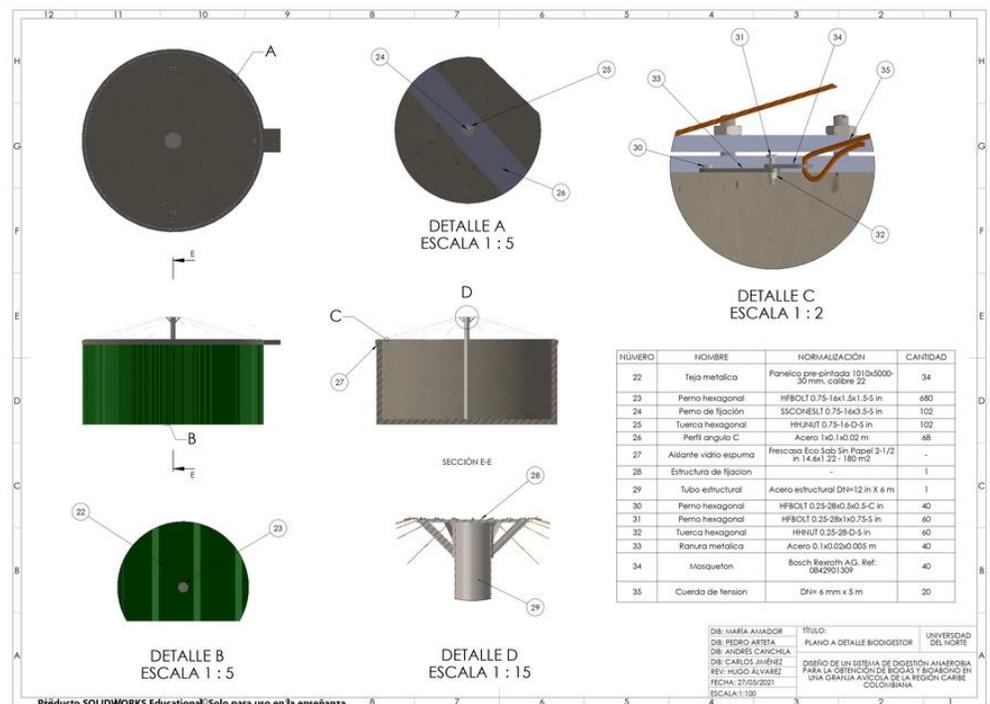


Figura 6. Plano a detalle de los componentes del biodigestor diseñado.

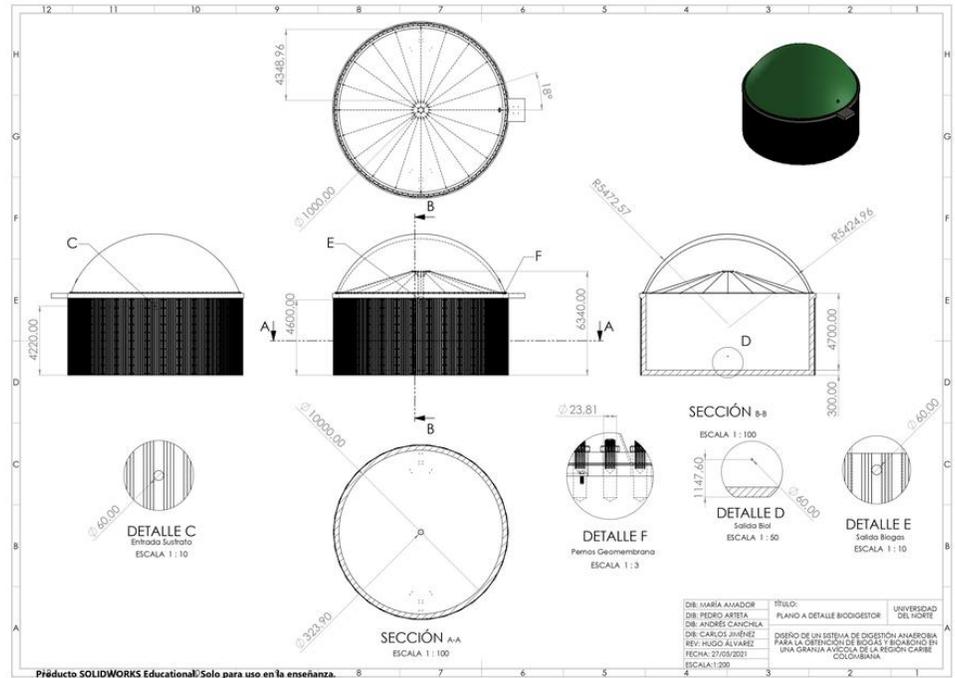


Figura 7. Plano a detalle del biogestor diseñado.

Finalmente, en la Figura 8 se observa el resultado final del sistema de digestión anaerobia diseñado con sus respectivos componentes a escala real.



Figura 8. Diseño final del sistema de digestión anaerobia.

4. Conclusiones

Este proyecto es un punto de partida en Colombia para el desarrollo de la tecnología de digestión anaerobia aplicado al manejo de residuos de gallinas ponedoras de pastoreo libre en galpones, ya que en el estado del arte y la

técnica es evidente la ausencia de proyectos o investigaciones en este campo en la región Caribe.

Por otro lado, se logró estimar un aproximado de la cantidad de biogás que se espera producir a través del modelo de Chen-Hashimoto y datos de producción de biogás de la excreta de gallinas ponedoras extraídos de la literatura. En concreto, se espera una producción de biogás por día dentro del rango de 383-454 m³/día dado que nos encontramos ante un proceso totalmente dinámico que depende de variables externas como lo es la temperatura ambiente, que juega un papel fundamental en la predicción de producción. Es por esto que, con dicha cantidad de biogás a producir, se estima una generación de energía eléctrica dentro del rango de 690-818 kWh/día, variación que se da a razón de la cantidad de biogás producido, condiciones y estado de la máquina de combustión encargada de la generación eléctrica del proceso.

Existe un carácter innovador en la etapa inicial del proyecto, ya que los casos aplicados de digestión anaerobia en la industria avícola se realizan con desechos frescos y no necesitan de un proceso de eliminación de impurezas. Por lo tanto, al realizar la separación de la cama de las gallinas con sus desechos aprovechables se brinda solución y aplicabilidad al hecho de que la limpieza de los galpones sea cada 90 semanas. Es pertinente, que esta etapa del proyecto sea abordada en un futuro con más detalle por ser de los primeros casos a nivel mundial con esta situación.

Por último, se ve la necesidad de ejecutar proyectos por etapa del proceso para poder concretar un plan piloto en la región Caribe colombiana para el sector avícola. Predigestión, digestión, postdigestión y generación de energía deben ser proyectos independientes que satisfagan el objetivo general de construir un sistema de generación de biogás y bioabono aplicable en un entorno real.

Nomenclatura

H ₂ O:	Agua
Q:	Alimentación diaria del proceso de digestión
BOM:	Bill Of Materials
$SV_{digestato}$:	Concentración de solidos volátiles del digestato
ST_{mezcla} :	Concentración de solidos totales en la mezcla
$ST_{digestato}$:	Concentración de solidos totales del digestato
S:	Concentración de sustrato en el digestor
S_o :	Concentración inicial de sustrato del digestor
K:	Constante adimensional de inhibición de Chen-Hashimoto
ρ :	Densidad
d:	Día

E:	Eficiencia en la eliminación de sustrato
FENAVI:	Federación Nacional de Avicultores
$m_{H_2O\ saturada}$:	Flujo másico de agua saturada que se va con el biogás
$m_{biogás}$:	Flujo másico de biogás producido dentro del digestor
m_{camas} :	Flujo másico de camas (Cascarilla de arroz y viruta de madera)
$m_{alimentación}$:	Flujo másico de entrada al digestor
$m_{excretas}$:	Flujo másico de excretas
$m_{impurezas}$:	Flujo másico de impurezas (Plumas, residuos de alimentos, etc)
$m_{ST\ digestato}$:	Flujo másico de sólidos totales del digestato
$m_{H_2O\ digestato}$:	Flujo másico del agua que contiene el digestato
$m_{digestato}$:	Flujo másico del digestato
m_T :	Flujo másico total de residuos
Q_e :	Flujo volumétrico de excretas
C°:	Grados centígrados
g:	Gramos
h:	Hora
X:	Humedad absoluta/concentración de microorganismos
kg:	Kilogramo
kWh:	Kilowatt por hora
CH_4 :	Metano
m:	Metros
ODS:	Objetivos de Desarrollo Sostenibles
$Q_{Biogás}$:	Producción diaria de Biogás
P_v :	Producción de metano/biogás por unidad de tiempo y volumen del reactor
P_c :	Producción de metano/biogás referido al sustrato
G_o :	Producción de metano por unidad de materia orgánica degradada
ST:	Sólidos Totales
SV:	Sólidos Volátiles
μ :	Tasa de crecimiento específico de microorganismos
T:	Temperatura
θ :	Tiempo de retención hidráulico
t:	Toneladas
r_x :	Velocidad de crecimiento de microorganismos
r_s :	Velocidad de utilización del sustrato
V_r :	Volumen de reacción

Referencias

- [1] J. Carrillo Erdozain, "Estudio básico del biogás y nuevas tecnologías para producirlo en la actualidad," B.S. Thesis, Ing. Ind. Quim. Esc. Téc. Sup. Ing. Industrial, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, Jun. 2019.

- [2] J. Aguilar Genes, "Estimación del potencial de energía eléctrica a partir de una unidad de volumen de excreta de gallina proveniente de granjas avícolas," B. S. Thesis, Esc. Ing. Elec. Electron., Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2015.
- [3] Huevos Kikes, "Bioenergía para la sostenibilidad," www.huevoskikes.com, <https://www.huevoskikes.com/noticias/bioenergia-para-la-sostenibilidad>, 2017
- [4] F. Ávila Cortés, "*Biogás, una alternativa poco conocida y financieramente inexplorada*," *Documentos Avícolas*, no. 14, pp. 13-25, 2019, <https://fenavi.org/publicaciones-programa-economico/documentos-avicolas-no-14/>
- [5] M. Velásquez, J. Rincón, P. Guevara, J. Vargas, D. Castellanos, C. Duarte, O. Quintero, D. Durán, Y. Morales, L. Zarama, J. Quintero, "*Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento*," G. Inv. Proc. Quím. Bioquim., Fac. Ing. U. Nac. Col., Tecsol, Contrato 001-2017 UPME-UNAL, 2018, <https://bdigital.upme.gov.co/jspui/bitstream/001/1317/1/Informe%20final.pdf>
- [6] Marianna Garfí, Liliana Castro, Neus Montero, Humberto Escalante, Ivett Ferrer, "Evaluating environmental benefits of low-cost biogas digesters in small-scale farms in Colombia: A life cycle assessment," *Bioresour. Technol.*, vol. 274, pp. 541-548, Feb. 2019, Art. No.30562711, DOI: 10.1016/j.biortech.2018.12.007.
- [7] De Silvestri, "*Avicultura - De Silvestri*," www.deilvestri.com.co, <https://desilvestri.com.co/service/avicultura/> [Accessed: 11- Mar- 2021].
- [8] ONU, "Energía Asequible y no contaminante", en "*Objetivos de Desarrollo Sostenible*" <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/> [Accessed: 18- Mar- 2021].
- [9] L. Fernández-García, "Selección y dimensionado de un sistema de generación de biogás mediante digestión anaerobia de purines codigeridos con glicerina," B.S. Thesis, Universidad de Cádiz, Cadiz, España, 2016.
- [10] B. Fairchild, M. Czarick, "Poultry Housing Tips, monitoring litter moisture," The University of Georgia, March 2011, <https://www.poultryventilation.com/system/tdf/vol23n3.pdf?file=1&type=node&id=4839&force=>
- [11] A. Gagliano, F. Nocera, M. Bruno, "Simulation Models of Biomass Thermochemical Conversion Processes, Gasification and Pyrolysis, for the Prediction of the Energetic Potential," *Adv. Renew. Ener. Power. Technol.*, vol 2, pp. 39-85, March. 2018, 10.1016/B978-0-12-813185-5.00002-4.

- [12] M. Vamero, "Manual del Biogás," Editado por Proyecto CHI/00/G32 " *Chile: Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables,*" Minenergía/PNDU/FAO/GEF, 2011, <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- [13] Y. R. Chen, A. G. Hashimoto, "Kinetics of methane fermentation (No. CONF-780549-8)," *Science and Education Administration, Clay Center, Meat Animal Research Center, NE, USA, 1978,* <https://www.osti.gov/biblio/6534841>
- [14] A. G. Hashimoto, "Methane from cattle waste: effects of temperature, hydraulic retention time, and influent substrate concentration on kinetic parameter (K)," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 24, no. 9, pp. 2039-2052, Sep. 1982.
- [15] D. T. Hill, "Methane Productivity of the Major Animal Waste Types," *Trans. ASAE*, vol. 27, n.o 2, pp. 530-0534, 1984, DOI: 10.13031/2013.32822
- [16] I. Guerrero, "Diseño de un biodigestor para la obtención de biogas a partir de las excretas de las gallinas provenientes de la Granja Avícola "Bilbao" en la parroquia Cotaló-Pelileo", B.S. Thesis, Dep. Ing. Biotec. Amb., Esc. Sup. Politec. Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2016, <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6212> [Accessed 4 October 2021].
- [17] J. Gelegenis, D. Georgakakis, I. Angelidaki, I., V. Mavris, "Optimization of biogas production by co-digesting whey with diluted poultry manure," *Renewable Energy*, vol. 32, no. 13, pp. 2147-2160, 2007.