

Diseño de un biodigestor en línea para el procesamiento de la fracción orgánica de RSU en la empresa Ecosangil

Inline biodigester design for MSW organic fraction processing in Ecosangil company

Yesica María Niño Ardila¹, Jurley Melissa Pereira Ortiz¹ y Freddy Alexander Jara Mora²
Fundación Universitaria de San Gil - Unisangil
Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Programa Ingeniería Ambiental
San Gil, Colombia

ynino@unisangil.edu.co
jmpereira@unisangil.edu.co
fjara@unisangil.edu.co

Fecha de recepción: 15 de febrero de 2021
Fecha de aceptación: 04 de febrero de 2022

Resumen — El presente proyecto pretende implementar un estudio de dimensionamiento de un biodigestor de tipo continuo que permita aprovechar los residuos orgánicos mediante el proceso de digestión anaerobia. Para cumplir con lo antes mencionado, se realizó una recopilación bibliográfica luego una caracterización de residuos para determinar el potencial de generación de biogás y bioabono. Este proyecto beneficiaría económicamente a la empresa Ecosangil S.A.S., e igualmente reducirá diversos impactos ambientales negativos por el aprovechamiento de gases de efecto invernadero como el metano. Durante el proceso de diseño se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros ambientales y técnicos: porcentaje en peso de cada tipo de residuo, relación carbono nitrógeno, porcentaje de humedad, tiempo de retención hidráulico y velocidad de carga orgánica ya que estos factores pueden afectar, mejorando o inhibiendo, el funcionamiento del proceso de digestión anaerobia. Se usó la herramienta CAD SolidWorks que permite representar en tercera dimensión el diseño básico de acuerdo con los valores estructurales necesarios.

Palabras clave — Anaerobio, biodigestor, biogás, materia orgánica, CAD.

Abstract — The present project intends to implement a study of dimensioning of a continuous type biodigester that allows to take advantage of the organic residues through the process of anaerobic digestion. To accomplish with the aforementioned, a bibliographical recopilation was carried out, then a residue characterization was carried out to determine the potential for biogas and biofertilizer generation. This project will economically benefit the company Ecosangil S.A.S. and reduce various negative environmental impacts from the use of greenhouse gases such as methane. During the design process, the following environmental and technical parameters were taken into account: percentage by weight of each type of waste, carbon – nitrogen ratio, percentage of moisture, hydraulic retention time and organic loading speed since these factors can affect, improving or inhibiting the functioning of the anaerobic digestion process. The CAD Solid Works tool is used to represent the basic design in the third dimension according to the necessary structural values.

Keywords — Anaerobe, biodigester, biogas, organic material, CAD.

¹ Ingeniero Ambiental, Unisangil.

² Docente, Unisangil. Ingeniero Mecánico UIS, Especialista en evaluación y gerencia de proyectos, UIS.

I. INTRODUCCIÓN

Debido al crecimiento acelerado de la población, el consumo aumenta de manera exponencial, esto conlleva a la generación desmesurada de residuos que, en su gran mayoría, no se aprovechan de forma adecuada. Frente a esta problemática se han planteado tecnologías que buscan gestionar adecuadamente los residuos sólidos. Una de estas es la producción de biogás, generada a partir de la digestión anaerobia de residuos orgánicos, además, en este proceso se genera otro subproducto: bioabono que permite mejorar las características de los suelos. De esta manera, se realiza el diseño de un biodigestor de flujo continuo que consiste en un reactor que trabaja bajo el sistema de una etapa en vía seca; la opción más factible por sus características y cualidades favorables es la tecnología Dranco.

Esta alternativa genera un progreso sostenible y mejora las condiciones económicas, ambientales y sociales para el sector que lo desee implementar. Ecosangil S.A.S., empresa receptora de residuos sólidos orgánicos de algunos municipios, respalda esta iniciativa que pretende contribuir con el medio ambiente.

II. METODOLOGÍA

El objetivo fundamental es diseñar un biodigestor que cumpla con los requerimientos de la empresa Ecosangil S.A.S., en correspondencia con la tecnología más utilizada en el mundo, con un bajo costo y mejores características.

Una vez establecida la tecnología óptima, la metodología a seguir es la siguiente:

Se realiza la caracterización con el objetivo de conocer la composición y, de esta manera, la biodegradabilidad del residuo que se tratará en el biodigestor. Inicialmente se recolecta la información necesaria que permita determinar el potencial de generación de biogás a partir de la literatura revisada. De acuerdo con esta información, se identifican factores importantes como: relación carbono/nitrógeno, porcentaje de nitrógeno y porcentaje de humedad.

Se realiza una caracterización y calificación de las cualidades de los diferentes tipos de procesos anaerobios para los residuos sólidos orgánicos con el fin de seleccionar la tecnología con mejores características. Teniendo como premisa los parámetros de diseño del digestor anaerobio ideal, se establecieron los cálculos de dimensionamiento que permitan cumplir con los requerimientos de carga y los subsistemas que componen totalmente el biodigestor.

Finalmente, se realiza el diseño básico definitivo con apoyo de la herramienta CAD donde se detalla cada uno de los componentes que conforman el digestor anaerobio Dranco.

III. RESULTADOS

A. Caracterización física de residuos sólidos urbanos

Se realiza la caracterización tomando como referencia 6 municipios del sur de Santander: Palmar, Oiba, Ocamonte, Páramo, Encino y San Gil, para que haya un correcto muestreo acorde con el método que se describe a continuación.

El método de muestreo utilizado fue por conglomerados, asumiendo al inicio que los porcentajes de tipos de residuos entre los diferentes municipios no cambian sustancialmente. Esta suposición es comprobada debido a que la varianza entre municipios es prácticamente igual a la varianza dentro de cada municipio aplicando una prueba Anova (Tabla 1).

TABLA 1. PRUEBA ANOVA CON LAS VARIABLES DE AGRUPACIÓN "MUNICIPIO"

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Munici-pio	5	0,01449	0,002898	0,13	0,983
Error	32	0,69277	0,021649		
Total	37	0,70726			

Por consiguiente, se procede a determinar el proceso de muestreo y tamaño de la muestra. Al tomar el promedio de cada tipo de residuo entre los municipios, se obtienen los siguientes valores (Tabla 2):

TABLA 2. PROMEDIO DE CADA TIPO DE RESIDUO ENTRE MUNICIPIOS

RESIDUO	PORCENTAJE
Canino	7.3%
Papa yuca	13.5%
Tomate cebolla	11.1%
Mazorca	3.4%
Residuo fruta	28.5%
Cáscara plátano	15.9%
Otros	24.2%

La proporción promedio de cada tipo de residuo es del 14.8%.

Al establecer la fórmula de muestreo (1) para poblaciones finitas (municipios) y con proporciones (porcentaje de residuos), se aplica la siguiente ecuación [1]:

$$n = \frac{Z^2 NPQ}{e^2(N-1) + Z^2 PQ} \quad (1)$$

Donde:

P : es la proporción promedio de los residuos (14.8%).

Z : es el puntaje Z a un nivel de confiabilidad determinado (1.34).

e : es el error de la proporción tolerable en el muestreo (18%).

N : es el tamaño de la población (población de municipios, 40).

Para un porcentaje de confiabilidad del 82%, en las tablas de distribución de probabilidad normal se encuentra que $Z = 1.34$. Tomando como base una confiabilidad del 82% y un error tolerable del 18%, se puede aplicar el reemplazo:

$$n = \frac{(1.34)^2(40)(0.148)(0.852)}{(0.18)^2(40 - 1) + (1.34)^2(0.148)(0.852)} = 6.08$$

Lo que indica que se requieren 6 municipios para muestrear con el nivel de confiabilidad dado.

Una vez conocido el muestreo a implementar, se clasifican los residuos orgánicos en sus diferentes categorías. Una vez obtenida la clasificación se procede a pesar las muestras para determinar la cantidad de desechos que llegan a la empresa.

Luego se determina el porcentaje en peso (2) de cada uno de los residuos de la siguiente manera y registrado en la Tabla 3.

$$\%kg \text{ residuo} = \frac{kg \text{ residuo}}{kg \text{ Total Muestra}} * 100 \quad (2)$$

TABLA 3. PORCENTAJE KILOGRAMO DE RESIDUO POR MUNICIPIOS

Residuo	Totales (kg) de los municipios	%kg residuo
Heces canino	0,2	0,2%
Papas + yucas	14,8	17,0%
Tomate + cebolla	3,1	3,6%
Mazorca	5	5,7%
Desperdicio de fruta	26,5	30,4%
Cáscara de plátano	14,8	17,0%
Otros biodegradables	22,7	26,1%
Plástico	2,1	2,4%
Total biomasa	87,10	100%

Adicionalmente se estima la cantidad de residuos al mes que se generarán proyectada a 10 años cumpliendo así con su período de diseño (3):

$$\frac{To}{mes} = \%kg \text{ residuo} * \text{Proyección Total Orgánico } 2.029 \quad (3)$$

TABLA 4. RESIDUOS GENERADOS EN UN MES CON LAPSO DE 10 AÑOS

Residuo	To/mes
Heces canino	10,24
Papas + yucas	757,96
Tomate + cebolla	158,76
Mazorca	256,07
Desperdicio de fruta	1357,15
Cáscara de plátano	757,96
Otros biodegradables	1162,54
Plástico	107,55
Total biomasa/mes	4460,68

B. Estimación potencial de productos de la digestión

Los siguientes valores con sus respectivas fuentes permiten conocer la composición química y molar de la biomasa aplicando la ecuación (4).

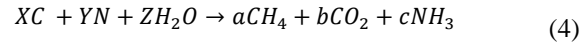


TABLA 5. FACTORES QUE PERMITEN DETERMINAR EL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS

Residuo	Relación C/N	% Nitrógeno	% Humedad	Fuente
Food waste	15	2,4	70	(Albarracín Daza <i>et al.</i> , 2014) (Tchobanoglous & Kreith, 2002)
Mazorca	89,5	0,6	13,5	(Tchobanoglous & Kreith, 2002)
Frutas	34,5	1,75	78,7	(Albarracín Daza <i>et al.</i> , 2014) (Tchobanoglous & Kreith, 2002)
Tubérculos	2,5	1,54	52,7	(Arenas Guayazan, 2019)
Cáscara de plátano	50	1,13	9,3	(Arenas Guayazan, 2019)
Heces caninas	17	0,175	98,50	(Rodríguez Pachón & García Cepeda, 2017)
Hortalizas	17	1,80	94	(Mariana & Daniel, 2016; Paul, 2017)

Con base en los datos, se establece la composición molar que permite calcular la fórmula química de la biomasa.

$$X = \frac{C}{N} * \frac{\%N}{Mm} \quad Y = \frac{\%N}{Mm} \quad Z = \frac{\%H_2O}{Mm}$$

$$c = Y \quad b = \frac{Z}{2} \quad a = X - b \quad (5)$$

Posteriormente se calculan el peso de los productos por kilogramo de residuo mediante una fórmula para hallar el peso de metano (6), del dióxido de carbono (7) y de amoníaco (8).

$$KgCH_4 = \frac{a}{MmCH_4} \quad (6)$$

$$KgCO_2 = \frac{b}{MmCO_2} \quad (7)$$

$$KgNH_3 = \frac{c}{MmNH_3} \quad (8)$$

Para determinar el volumen de metano y de dióxido de carbono producido, se conoce que las densidades (9) de estos productos son:

$$\rho_{CH_4} = 717 \frac{g}{m^3} \quad \rho_{CO_2} = 1978 \frac{g}{m^3} \quad (9)$$

De esta manera, el volumen de metano y dióxido de carbono se calcula así (10) y (11):

$$V_{CH_4} = \frac{Kg_{CH_4}}{\rho_{CH_4}} * 1000 \quad (10)$$

$$V_{CO_2} = \frac{Kg_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} * 1000 \quad (11)$$

Finalmente, se halla el volumen total de biogás que se produce en el mes, teniendo en cuenta el peso total de los residuos que se generarán para el año 2029 (4460,68 To/mes) y el porcentaje en peso de cada uno de los residuos previamente estimados en la Tabla 6.

TABLA 6. CÁLCULO TOTAL DEL POTENCIAL DE BIOGÁS

TOTALES				
C/N:	35,07		X:	0,039204847 kmol C/kg residuo
%N:	1,34		Y:	0,000958163 kmol N/kg residuo
%H ₂ O:	59,5		Z:	0,033068783 kmol H ₂ O/kg residuo
%ST:	40,5			
Moles de productos:				
Mm hidrógeno:	1	kg/k mol	c:	0,000958163 kmol NH ₃ /kg residuo
Mm nitrógeno:	14	kg/k mol	b:	0,016534392 kmol CO ₂ /kg residuo
Mm agua:	18	kg/k mol	a:	0,022670455 kmol CH ₄ /kg residuo
Mm carbono:	12	kg/k mol		
Pesos productos por kilogramo de residuo:				
Mm CH ₄ :	16	kg/k mol	CH ₄	0,362727286 kg CH ₄ /kg residuo
Mm CO ₂ :	44	kg/k mol	CO ₂	0,727513228 kg CO ₂ /kg residuo
Mm NH ₃ :	17	kg/k mol	NH ₃	0,016288776 kg NH ₃ /kg residuo
Densidad CH ₄ :	717	g/m ³		
Densidad CO ₂ :	1978	g/m ³		
Volúmenes por kilogramo de residuo:				
% residuo de estudio:	100,0%		CH ₄	0,505895797 m ³ /kg residuo
Peso total residuos 2029:	4460,68	To/mes	CO ₂	0,367802441 m ³ /kg residuo
Volumen total por kilogramo residuo:				
			V:	0,873698238 m ³ /kg residuo
Volumen total:				
			Vtot:	3897288,25 m ³ /mes
			Vtot:	162387,01 m ³ /día

C. Selección del diseño

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de los diferentes procesos de digestión, se realiza la puntuación con base en las características planteadas tomando como referencia los criterios definidos junto con la empresa Ecosangil S.A.S. y la función primordial del sistema de digestión se establece que el digestor que más se adapta es el de flujo continuo, de esta manera cumpliendo las expectativas de la empresa en la elección de este.

Se conocen tres tecnologías que trabajan bajo este sistema siendo la tecnología idónea según el contenido de sólidos de los residuos que usualmente se disponen en la empresa, el sistema Dranco.

TABLA 7. PARÁMETROS DE DISEÑO

Parámetros de diseño		
Masa de entrada al biodigestor	4460,68	To/mes
Masa de entrada al biodigestor	185862	kg/día
Días de operación biodigestor en el mes	24	días/mes
Horas de operación al día	8	horas/día
Tiempo de la digestión	20	Días
Ciclos de volumen por mes	1	
Densidad del residuo sólido	1186,553	kg/m ³
Volumen inyectado por día	157	m ³ /día
Volumen tanque una sola pasada	3759	m ³
Aumento de volumen por seguridad	20	%
Volumen de diseño	4511	m ³

D. Dimensionamiento del digestor

La biomasa entrante al sistema es 4460,68 To/mes (185862kg/día). La alimentación ocurre continuamente durante 8 horas/día por 6 días a la semana, de esta manera, operando durante 24 días/mes; este horario de alimentación ayuda a proporcionar una indicación de la salud de los microorganismos sobre qué tan rápido responden a la cantidad cambiante de alimento.

El tiempo de digestión de esta tecnología es de 20 días correspondientes a 1 ciclo de volumen por mes, con el fin de llevar a cabalidad todas las etapas de digestión.

Inicialmente se calculó el volumen de la biomasa entrante por día teniendo en cuenta la relación masa/densidad de los residuos previamente calculados, posteriormente se halla el volumen teórico del reactor con base en los días de operación durante el mes.

Para seguridad del sistema a modo de evitar roturas o cualquier tipo de anomalías, se diseña con un 20% superior al volumen teórico.

Teniendo como premisa estos parámetros, se establecieron los cálculos de dimensionamiento que permitan cumplir con los requerimientos de carga y los subsistemas que componen totalmente el biodigestor (Tabla 8 y Fig. 1).

TABLA 8. DIMENSIONES DEL REACTOR DRANCO

Medida	Valor	Unidad
H1	22,0	m
H2	12,0	m
D	15,0	m
Volumen tanque una sola pasada	4594,6	m³

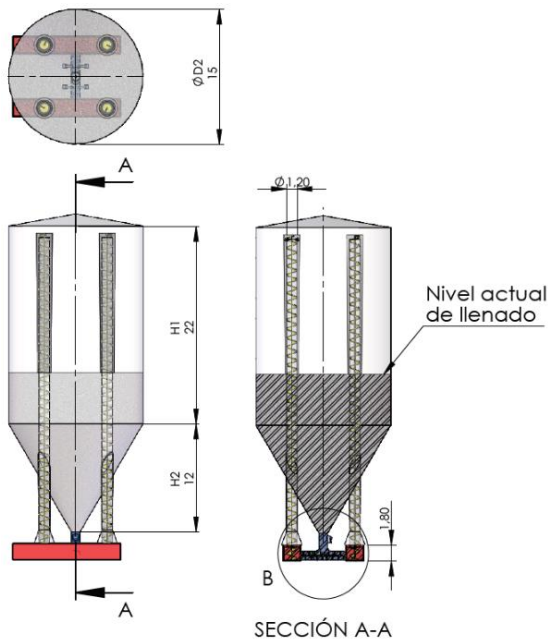


Fig. 1. Dimensiones generales del reactor Dranco.

Por medio de la retroalimentación bibliográfica se estima que la tecnología óptima parte de un diseño cilíndrico de fondo cónico, donde se determina el volumen teórico real del tanque, dando como resultado un valor de 4511 m³ en el Dranco y de 29793 m³ en los cuatro tanques esféricos de almacenamiento de biogás comprimido a 10 bares (Tabla 9 y Fig. 2).

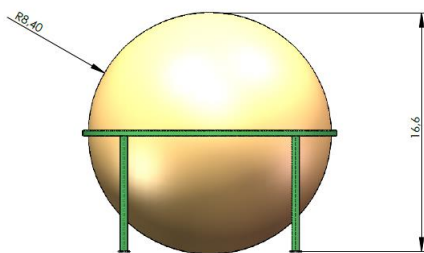


Fig. 2. Dimensiones generales del tanque de almacenamiento esférico.

TABLA 9. DIMENSIONES DEL TANQUE DE BIOGÁS

Dimensionamiento del tanque de biogás		
Volumen de biogás generado	3897288,3	m ³ /mes
Volumen de biogás generado	162387	m ³ /día
Volumen de biogás generado	20298	m ³ /hora
Presión manométrica de operación del compresor	10	bar
Presión manométrica de operación del compresor	1000	kPa
Presión atmosférica	101	kPa
Presión absoluta de operación del compresor	1101	kPa
Factor de reducción de volumen	10,90	-
Tiempo de almacenamiento del biogás en el tanque esférico	2	días
Volumen tanque almacenamiento biogás	29793	m ³
Número de tanques de almacenamiento	4	-
Radio de la esfera	8,4	m
Volumen de biogás generado a la salida del compresor	1862	m ³ /hora

IV. CONCLUSIONES

Se logra el diseño básico de un digestor anaerobio de flujo continuo que satisface los requerimientos de la empresa Ecosangil S.A.S., mediante el desarrollo y cumplimiento de los objetivos establecidos.

Mediante la recopilación de información de la literatura se identifica una alternativa tecnológica amigable con el medio ambiente, su mayor beneficio es reducir la emisión de gases de efecto invernadero y obtener beneficios económicos y energéticos ya que al ser derivado de la biomasa constituye una fuente de energía renovable. El valor adicional del residuo orgánico se traducirá en una mayor valoración o calefacción.

El diseño está orientado a aprovechar 4460,68 To/mes estimados para el año 2029 mediante un modelo de estudio de crecimiento poblacional y de mercado por la expectativa de contratos con otros municipios. Se aprecia que la tecnología que más se adapta a los requerimientos de la empresa es la Dranco, que trabaja bajo la digestión anaerobia con alimentación continua seca, siendo este más flexible en cuanto a la aceptación de materiales que no son biodegradables y que no afectan la conversión de los componentes de la biomasa, se da en un proceso de una etapa que básicamente simplifica su diseño, construcción, operación y, por lo general, son menos costosos, cuenta con un reactor de disposición vertical permitiendo una descarga por gravedad y menos requerimientos de superficie, lo que facilita su posterior implementación.

La biomasa dispuesta en Ecosangil produce 3897288,3 m³/mes de biogás por lo cual, para lograr su aprovechamiento total, se requiere de un compresor que permita una distribución óptima en las redes de gas.

La caracterización física permite evidenciar que tipos de residuos se reciben en la empresa, la mayor cantidad de residuos que se pueden aprovechar (9 aprovechables) con el fin de determinar los tratables para la digestión anaerobia y estimar su potencial de generación de biogás mediante parámetros operacionales importantes como: relación C/N, porcentaje de nitrógeno y porcentaje de humedad, suministrados mediante recopilación bibliográfica.

Para el desarrollo del diseño conceptual es de vital importancia apoyarse en herramientas como CAD que permiten representar el modelo del equipo con sus respectivos componentes. Adicionalmente comunicar las ideas de ingeniería de manera adecuada y permite almacenar y administrar la información de una manera idónea.

REFERENCIAS

- [1] R. Hernández Sampieri, C.Fernández Collado, y P. Baptista Lucio. *Metodología de la investigación*. 6a. México D.F.: Mc. Graw Hill. 2014.
- [2] Mežule, L. y otros. "A simple technique for water disinfection with hydrodynamic cavitation: Effect on survival of Escherichia coli. Edinburgh: s.n., 2009, *Desalination*, vol. 248, p. 1066. ISSN: 0011-9164.
- [3] Aerzen Ibérica S.A.U. (2020). Soluciones de Aerzen para biogás. Compresores para biogás y biometano. [en línea] Disponible en: https://www.aerzen.com/fileadmin/user_upload/02_documents/02-02_applications/02-02-07_biogas-biomethane/B1-001-03_ES_Spain.pdf
- [4] J. C. Akunna, *Anaerobic Waste-Wastewater Treatment and Biogas Plants. A practical handbook*. CRC Press. 2019.
- [5] FAO. (2011). *Manual del biogás*. [en línea] Disponible en: <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- [6] Ideam. (s.f.). Corporación Autónoma Regional de Chivor. [en línea] Disponible en: <https://www.corpochivor.gov.co/wp-content/uploads/2016/06/Anexo-1-Marco-Juridico-RUA-Manufacturero.pdf>.
- [7] B. D. Arenas Guayazan, Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, generados en las viviendas del proyecto "La Villa Solar" ubicado en la ciudad de Buenaventura- Colombia. Universidad de La Salle. 2019 [en línea] Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2123&=content=ing_ambiental_sanitaria&=seiredir=1&referer=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252Furl%253Fq%253Dhttps%253A%252F%252Fciencia.lasalle.edu.co%252Fcgi%252Fviewcontent.cgi%253Farticle.
- [8] G. Tchobanoglous & F. Kreith. *Handbook of Solid Waste Management*. McGraw-hill. 2002. [en línea] Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=gG9n6jEvR1AC>