

Comparison of the calorific power and thermal performance of biogas produced from organic solid waste and liquefied petroleum gas

Gladys Sandi Licapa - Redolfo MSc.¹, Aldo Roger Castillo Chung, Mg.², Iván Alberto Reyes López, Dr.², Christian Michell Torres Rivera, Mg.², Gary Christian Farfán Chilicau, Ms.², Juan Antonio Vega Gonzalez, Dr.²

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú, gladys.licapa@upn.edu.pe,

²Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, alrocas@unitru.edu.pe, ireyes@unitru.edu.pe,
cotorres@unitru.edu.pe, gfarfanc@unitru.edu.pe, jvega@unitru.edu.pe,

Abstract– This research is focused on the production of quality biogas, under the monitoring of production parameters; with the general objective of determining the difference between the calorific power and the thermal performance of biogas produced from organic solid waste and liquefied petroleum gas.

The results obtained show a biogas with a specific heat of 958 Kcal/m³ and thermal yield of 9.25%, in addition to a production between 1.8 to 2 m³ of biogas for every 100L of daily load; The Anderson Darling test was applied to determine the normality of the data and the ANOVA test to contrast the results. This concluding that the levels of calorific power and thermal performance of biogas are of a high and functional level for any rural and urban project despite being lower than those of LPG, providing a reliable proposal for optimization of its waste and implementation of clean biogas production techniques.

Keywords: Biogas, temperature, retention time, percentage of water, calorific value.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.391>
ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

Comparación del poder calorífico y el rendimiento térmico del biogás producido a partir de residuos sólidos orgánicos y el gas licuado de petróleo

Gladys Sandi Licapa - Redolfo MSc.¹, Aldo Roger Castillo Chung, Mg.², Iván Alberto Reyes López, Dr.², Christian Michell Torres Rivera, Mg.², Gary Christiam Farfán Chilic aus, Ms.², Juan Antonio Vega Gonzalez, Dr.²

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú, gladys.licapa@upn.edu.pe,

²Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, alrocas@unitru.edu.pe, ireyes@unitru.edu.pe, cchorres@unitru.edu.pe, gfarfanc@unitru.edu.pe, jvega@unitru.edu.pe.

Resumen—Es una investigación enfocada a la producción de biogás de calidad, bajo el monitoreo de parámetros de producción; con el objetivo general de determinar la diferencia entre el poder calorífico y el rendimiento térmico de biogás producido a partir de residuos sólidos orgánicos y gas licuado de petróleo.

Los resultados obtenidos muestran un biogás con calor específico de 958 kcal/m³ y rendimiento térmico de 9.25%, además de una producción entre 1.8 a 2 m³ de biogás por cada 100L de carga diaria; se aplicó la prueba de Anderson Darling para determinar la normalidad de datos y la prueba ANOVA para contrastar los resultados. Concluyéndose así que los niveles de poder calorífico y rendimiento térmico del biogás son de nivel elevado y funcional para cualquier proyecto rural y urbano a pesar de ser menores que las del GLP, brindando una propuesta confiable de optimización de sus residuos e implementación de técnicas limpias de producción de biogás.

Palabras clave: Biogás, temperatura, tiempo de retención, porcentaje de agua, poder calorífico.

I. INTRODUCCIÓN

La base de la industrialización de los países ricos fue el uso masivo de combustibles fósiles y hoy sigue siendo un elemento principal de los procesos de cambio económico que caracterizan a los países más poblados del mundo. Desde hace mucho tiempo, en términos cuantitativos los combustibles fósiles aportan el grueso de la energía exosomática (es la generada transformando energía fuera del cuerpo humano, como la quema de gasolina en un tractor), utilizada por los humanos y la propia obtención de la energía endosomática (es generada a través de la transformación metabólica de la energía alimenticia en energía muscular en el cuerpo humano), la de los alimentos se ha hecho cada vez más dependiente del uso de combustibles fósiles. En las últimas décadas con una ligera inflexión debida a la crisis actual se ha utilizado más petróleo, más carbón y más gas natural que nunca en la historia. La gran dependencia al uso de combustibles fósiles ha generado dos tipos de preocupaciones que han dominado en diferentes momentos históricos, desde el año 1992 ha dominado la preocupación por los impactos ambientales de la quema masiva de combustibles fósiles y sus efectos en el cambio climático.

Las actividades que generan gases de efecto invernadero son diversas, pero hoy el factor más importante es sin duda la emisión de CO₂ asociada a la obtención de energía. [1]. El uso adecuado de los residuos orgánicos se logra mediante diferentes tratamientos que implican un reciclaje de estas materias orgánicas, transformándolas en productos con valor agregado. El reciclaje de materia orgánica ha recibido un fuerte impulso con el alto costo de los fertilizantes químicos, con la búsqueda de alternativas no tradicionales de energía, así como también, la necesidad de vías de descontaminación y eliminación de residuos[2].

TABLA I
CARGAR DIARIA, PRODUCCION DE BIOGAS Y DESCARGA DE BIOFERTILIZANTE

Carga diaria (t)	Biogás/día (m ³)	Biofertilizante de descarga/día (m ³)
80	1.6	60
100	2	80
120	2.4	100
140	2.8	120
160	3.2	140
150	3.6	160
200	4	180
220	4.4	200
240	4.8	220
260	5.2	240
280	5.6	260
300	6	280

Nota: Estos datos son apenas indicativos o guías, para establecer a priori la producción de biogás [2].

Los residuos sólidos orgánicos se pueden transformar, por medio de la acción de microorganismos, en una mezcla de gases

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.391>
ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

llamada biogás, la mezcla de diferentes gases se produce por la descomposición anaeróbica de materia orgánica, principalmente formada por metano (CH_4). Asimismo, es un combustible ecológico, puesto que, al quemarse, produce monóxido de carbono y agua [3]. El biogás es un gas combustible que se puede obtener a partir de la biomasa, tal como son los desechos de humanos y de animales, residuos agrícolas, aceite de palma y plantas acuáticas. Este gas puede ser utilizado, por ejemplo, como combustible para motores que mueven una bomba de agua, en alumbrado y en la cocción de alimentos [4]. Tiene un poder calorífico de 4 700 a 5 500 kcal/m³, es decir, 1 m³ de biogás puede reemplazar 0.46 kg de gas propano, 0.71 kg de gasolina, ó 3 kg de leña [5].

El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, es el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás. Este tiempo, por tanto, dependerá de la temperatura de la región donde se vaya a instalar el biodigestor. Así, a menores temperaturas se requiere un mayor tiempo de retención que será necesario para que las bacterias, que tendrán menor actividad, tengan tiempo de digerir el lodo y de producir biogás [5].

La producción combinada de combustibles fósiles de EEUU (incluidos el gas natural, el petróleo crudo y el carbón) en 2021 aumentó 2% siendo 77,14 billones de BTU. La Administración de Información Energética de EEUU (EIA) proyecta que la producción de combustibles fósiles de EEUU continúe incrementando en el 2022 y en 2023, superando la producción de 2019, dado que el 2020 tuvo una ligera caída, para alcanzar un nuevo récord en 2023. De la producción total de combustibles fósiles de EEUU en 2021, el gas natural seco representó el 46%, el petróleo crudo representó el 30%, el carbón el 15% y los líquidos de plantas de gas natural (GNPL) el 9%. Se espera que esto se mantenga en forma similar hasta 2023. En su pronóstico, la EIA considera que las mejoras en la eficiencia de la perforación y la producción de pozos nuevos contribuirán a aumentos de producción del 3% en 2022 y del 2 % en 2023 [6]. Argentina ha experimentado en los últimos cinco años un problema energético que se ha visto incrementado por el crecimiento económico y por la disminución de la relación reserva/consumo para gas natural e hidrocarburos líquidos. De los elementos que constituyen la matriz energética nacional, el carbón tiene menor incidencia, tanto para la producción como para la oferta interna, pero se lo debe reconsiderar como recurso energético, no sólo convencional, sino como una alternativa novedosa que puede ayudar a solucionar parcialmente el déficit energético. La demanda de energía está estrechamente relacionada con el crecimiento económico y los estándares de vida. De los combustibles fósiles más conocidos, el carbón, el petróleo y el gas natural, el primero suministra el 24 % de la energía primaria. Los principales productores de carbón son China (39,4%), Estados Unidos (19,3%), seguidos por India (6,6%), Australia (6,4%) y otros tales como Rusia, Sudáfrica, Kazajistán, Ucrania e Indonesia. Latinoamérica sólo produce el 1,7% de la producción mundial, donde Colombia aporta el 84% seguido por Venezuela con el 11 % y Brasil el 4%. Actualmente, la demanda mundial de energía está

incrementándose a una tasa promedio de 2,7% anual y en el caso del carbón en el último año ascendió a 4,5% [7]. En este escenario debe pensarse en otras fuentes energéticas alternativas para cubrir las necesidades de la población [8]. Y es donde se desarrolla la presente investigación en la producción de biogás de calidad a partir material orgánico, comparado con el gas licuado de petróleo, con monitoreo del poder calorífico y el rendimiento térmico.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. *Tipo de investigación.*

La investigación es de tipo aplicado cuantitativo, pues tiene la finalidad de aplicar técnicas para la generación de biogás, cuantificando parámetros como el poder calorífico, el rendimiento térmico del biogás producido y del gas licuado de petróleo (GLP) a comparar; con un método de investigación de tipo no experimental ya que la manipulación de las variables no será de manera deliberada para el desarrollo del procedimiento; con diseño descriptivo, correlacional causal y de carácter longitudinal pues se tomarán las muestras en diferentes puntos temporales con la finalidad de correlacionar los resultados obtenidos de poder calorífico y rendimiento térmico de biogás y GLP.

B. *Diseño de investigación.*

Por ser una investigación no experimental, descriptivo, longitudinal, se realizó un análisis estadístico básico para los datos recolectados mediante el método de normalidad de Arderson Darling de cada variable involucrada, también se utilizó el método ANOVA para contrastar el poder calorífico y rendimiento térmico del biogás y el GLP, esto determinó la calidad de biogás obtenido para luego determinar la influencia de la temperatura, porcentaje de agua y tiempo de retención en la calidad del biogás producido y verificar si es una alternativa adecuada para implementarla en un plan de gestión ambiental de residuos orgánicos.

C. *Procedimiento experimental*

1) *Proceso de obtención de la muestra:* 10 datos de temperatura, tiempo de retención, poder calorífico y rendimiento térmico de biogás y GLP.

2) *El biodigestor utilizado para la investigación:* es de modelo chino de flujo semi – continuo, es el modelo más extendido, debido a su durabilidad, fácil manejo, funcionabilidad y seguridad (Tabla II). Consta de una cámara cerrada con sus respectivas cámaras de carga y descarga. La estructura está construida de ladrillos, hormigón y las paredes internas impermeabilizadas con aplicación de cemento mezclado con porcelana para evitar fuga de fluidos. Esta clase de digestor de campana fija, almacena solamente un pequeño volumen del biogás generado en el interior, por lo que para funcionamiento continuo es necesario un contenedor diferente construido para este biogás producido (gasómetro), con el cual no se cuenta.

TABLA II
RESUMEN DE DIMENSIONES DE BIODIGESTOR DE TRABAJO

Componente	Especificación	Dimensión	Unidad
Sector de carga			
Cámara de ingreso	Volumen	0.216	m ³
Sector de digestión anaeróbica			
Cámara de digestión	Diámetro	3.1	m
	Profundidad	2	m
	Área basal	7.06	m ²
	Volumen total	10.23	m ³
Sector de descarga			
Cámara de descarga	Volumen	1.62	m ³

3) Proceso de limpieza e implementación:

3.1 Limpieza: La limpieza de biodigestor usualmente se deberá realizar después de 6 a 12 meses iniciado sus operaciones y/o cuando el sistema se encuentra sin trabajar. Primero revisar el biodigestor la operatividad, Fig. 1 (a), luego se abre la válvula de purga de lodos como se observa en la figura 1(b), luego de algunos segundos saldrán lodos de ser el caso ayudarse con una varilla flexible abriendo el registro roscado, e ingresar una bomba de succión. Eliminar todo el material residual que se encuentre y llenar con agua para liberar toda obstrucción y remanente. Finalmente hacer pruebas de filtración.



Fig. 1(a)



Fig. 1(b)

Fig. 1 (a), Revisión de biodigestor, (b) Limpieza del biodigestor de trabajo

3.2 Implementación: Para llevar un monitoreo adecuado se implementó con lo siguiente, sellos en la tapa de la cámara de digestión para evitar fugas. Manómetro para medir la presión del sistema antes durante y final de la experimentación, a partir del cual se medirá el caudal y volumen (Fig. 2(a)). Termómetro con sonda para medir la temperatura del sistema antes, durante

y final de la experimentación (Fig. 2(b)). Dos llaves de paso de media pulgada que permitirán las pruebas de presión, pruebas de poder calorífico y medidas de caudal.



Fig. 2(a)



Fig. 2(b)

Fig. 2 (a)Implementación de válvulas y manómetro y (b) Implementación de termómetro en biodigestor de trabajo.

4) Carga inicial y diaria:

4.1 Carga inicial: Preparación de la carga inicial o primera carga se realizó después de realizar la limpieza y las pruebas de fuga. Este proceso se caracteriza por el llenado de su capacidad líquida completa del digestor, a través de la parte superior del digestor (tapa). La materia fecal se disolvió a proporción 1 a 3 con agua en recipientes limpios de cualquier producto químico o combustible. El cálculo de volumen del biodigestor se realizó a partir de medidas de campo y mediante el uso de software especializado AutoCAD Civil 3D. Obteniéndose así un volumen total de 10.23 m³ en la cámara de digestión, ver tabla III.

TABLA III
REQUERIMIENTO DE CARGA INICIAL

Material	Unidades	Valor	Volumen total biomasa
Cantidad de materia fecal 70% humedad	kg	4166	5000 kg
Cantidad de agua	1	834	

4.2 Carga diaria: La carga diaria se realiza por medio de la cámara de ingreso, se prepara una mezcla de residuos (animales) con agua formando un lodo en proporción 1 a 3. El volumen total de esta mezcla esté en función del volumen total del digestor y del tiempo de retención y la capacidad de producción diaria. La biomasa se homogeniza y se deja entrar al digestor, el volumen (afluente) que entra, conlleva a que salga por el tubo de la cámara de salida igual volumen (efluente). Estima de los promedios de la carga y descarga de un biodigestor y respectiva producción de biogás.

5) Pruebas de inicio y producción de biogás: Transcurridos 20 días de la carga inicial o de arranque, se procedió a verificar el inicio de producción de biogás (CO_2 y CH_4 en proporción similar). Se utilizó un manómetro con caudalímetro para monitorear la producción de biogás, cantidad y presión en la cámara de biodigestión, así como pruebas de quema, mediante la verificación de “quema de biogás”. Se acopla una manguera a la salida de gas y utilizando un quemador o mechero, se probó si el gas se enciende. Si el gas quema con una llama azulada y de buena consistencia, se puede iniciar el uso normal del biogás. Se realizó también el cálculo de volumen total de gas a partir de la presión y temperatura del sistema.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Poder calorífico de biogás vs GLP

Se verificó que la producción diaria de biogás es entre 1.8m^3 a 2m^3 para una carga diaria de 100 litros, el biogás presenta un poder calorífico en promedio de 958.54 kcal/m^3 que comparándolo con el valor de poder calorífico de GLP en promedio de 1048.90 kcal/m^3 , es un valor muy cercano y de menor costo de producción, en la Figura 3 se observa los valores obtenidos en 10 repeticiones.

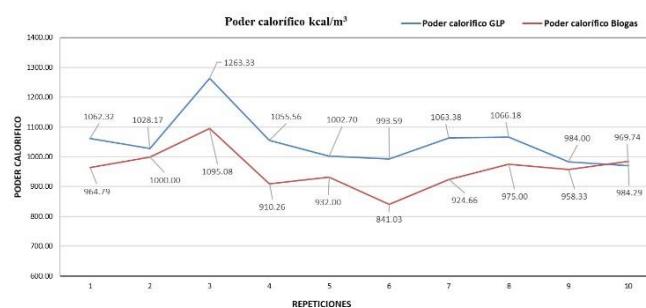


Fig. 3 - Poder calorífico de biogás vs GLP

B. Poder calorífico de biogás

Al observar la figura 4 de probabilidad normal se analiza que la dispersión de puntos aproximadamente presenta gran linealidad cercana a una recta por tanto existe normalidad en los datos.

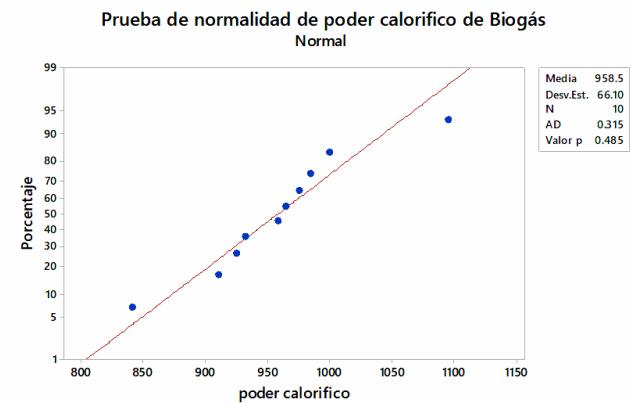


Fig. 4 - Prueba estadística Anderson Darling – Poder calorífico biogás.

En la tabla IV se observa que el valor estadístico de Anderson-Darling (AD) es cercano a 0, con valor 0.315 tiene y una probabilidad asociada p de 0.485 mayor al nivel de significancia 0.05, por lo tanto, no se tiene razón para rechazar la hipótesis nula y se concluye que: La distribución normal brinda un buen ajuste para la probabilidad de poder calorífico de biogás.

TABLA IV
PRUEBA DE ARDERSON DARLING-PODER CALORÍFICO DE BIOGÁS

Prueba estadística de Anderson-Darling (AD)	
AD = 0.315	
Hipótesis	H_0 = Los datos de poder calorífico se distribuyen normalmente H_1 = Los datos de poder calorífico no se distribuyen normalmente
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$
p	0.485
Descripción estadística	No se rechaza H_0
Conclusión	Se cumple el supuesto de normalidad. al tener una significancia del 5%.

C. Poder calorífico de GLP

Al observar la figura 5 de probabilidad normal se analiza que la dispersión de puntos aproximadamente presenta gran linealidad cercana a una recta por tanto existe normalidad en los datos.

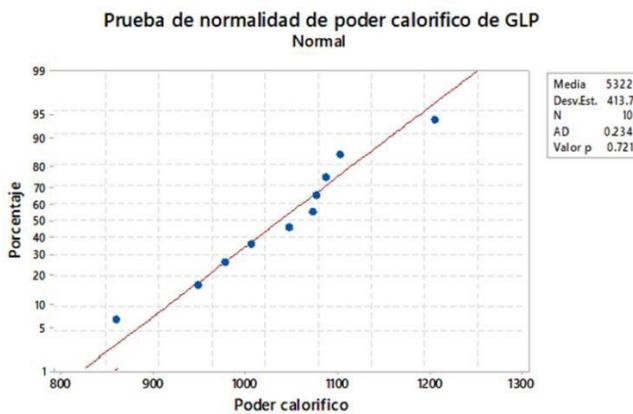


Fig. 5 - Prueba estadística Anderson Darling – Poder calorífico GLP

En la tabla V, se observa que el valor estadístico de Anderson-Darling (AD) es cercano a 0, con valor 0.234 tiene y una probabilidad asociada p de 0.721 mayor al nivel de significancia 0.05, por lo tanto, no se tiene razón para rechazar la hipótesis nula y se concluye que: la distribución normal brinda un buen ajuste para la probabilidad de poder calorífico de biogás.

TABLA V
PRUEBA DE ARDERSON DARLING-PODER CALORIFICO DE GLP

Prueba estadistica de Anderson-Darling (AD) AD = 0.234	
Hipotesis	H_0 = Los datos de poder calorífico se distribuyen normalmente. H_1 = Los datos de poder calorífico no se distribuyen normalmente.
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$
p	0.721
Desción estadistica	No se rechaza H_0
Conclusión	Se cumple el supuesto de normalidad. al tener una significancia menor del 5%.

D. Temperatura del sistema interno del Biodigestor

Al observar la figura 6, de probabilidad normal se analiza que la dispersión de puntos no presenta gran linealidad cercana a una recta por tanto no existe normalidad en los datos. Hecho que se puede analizar por los cambios de temperatura

que surgen al dar arranque al biodigestor e iniciar el proceso de digestión microbiana.

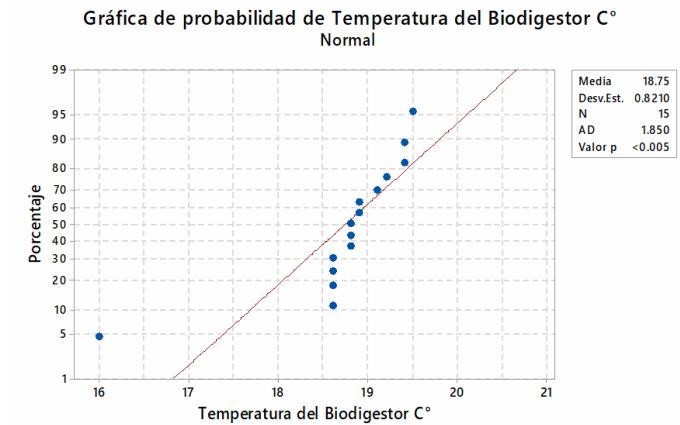


Fig. 6 - Prueba estadística Anderson Darling – Temperatura del sistema

En la tabla VI, se observa que el valor estadístico de Anderson-Darling (AD) es mayor a 1, con valor 1.820 y una probabilidad asociada p <0.005 menor al nivel de significancia 0.05, por lo tanto, se tiene razón para rechazar la hipótesis nula y se concluye que: La distribución normal brinda una conclusión que los datos de temperatura no siguen una distribución específica.

TABLA VI
PRUEBA DE ARDERSON DARLING-TEMPERATURA

Prueba estadistica de Anderson-Darling (AD) AD = 1.850	
Hipotesis	H_0 = Los datos de temperatura del biodigestor se distribuyen normalmente. H_1 = Los datos de temperatura del biodigestor no se distribuyen normalmente.
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$
p	<0.005
Desción estadistica	Se rechaza H_0
Conclusión	Se cumple el supuesto de normalidad. al tener una significancia menor del 5%.

E. Rendimiento térmico del biogás vs GLP

En la figura 7 se observa el rendimiento térmico del biogás y GLP para un total de 10 repeticiones, del cual se obtiene en promedio un rendimiento térmico de 9.23 % para el biogás y un promedio de rendimiento térmico de 11.06 % para el GLP, por lo tanto, es posible competir con productos como el GLP por la cercanía de rendimiento térmico que presenta el Biogás.

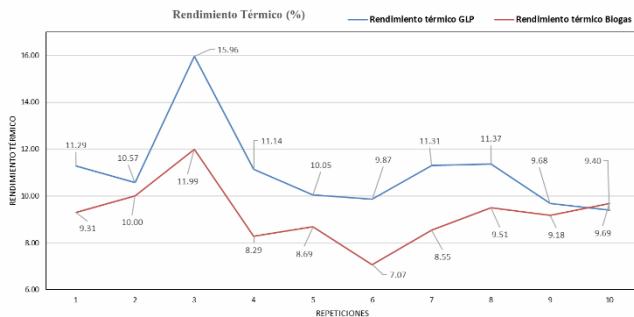


Fig. 7 – Rendimiento térmico de biogás vs GLP

F. Rendimiento térmico del biogás

Al ver la figura 8 de probabilidad normal se analiza que la dispersión de puntos aproximadamente presenta gran linealidad cercana a una resta por tanto existe normalidad en los datos.

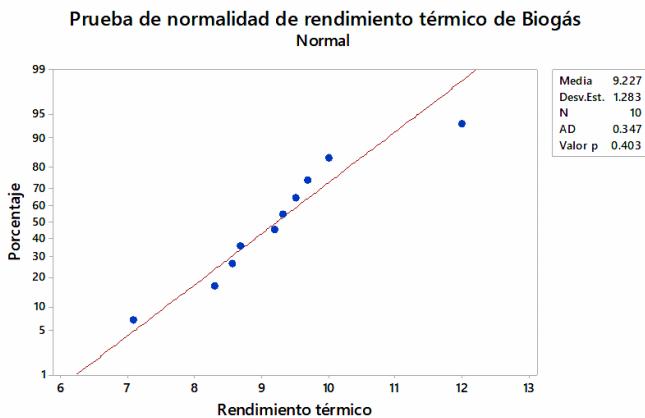


Fig. 8 Prueba estadística Anderson Darling – Rendimiento térmico biogás

En la tabla VII, se observa que el valor estadístico de Anderson-Darling (AD) es cercano a 0, con valor 0.347 tiene y una probabilidad asociada p de 0.403 mayor al nivel de significancia 0.05, por lo tanto, no se tiene razón para rechazar la hipótesis nula y se concluye que: La distribución normal brinda un buen ajuste para la probabilidad de rendimiento térmico de biogás.

TABLA VII
PRUEBA DE ARDERSON DARLING-RENDIMIENTO TERMICO BIOGAS

Prueba estadística de Anderson-Darling (AD) AD = 0.347	
Hipótesis	H_0 = Los datos de rendimiento térmico se distribuyen normalmente H_1 = Los datos de rendimiento térmico no se distribuyen normalmente
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$
p	0.403

Desición estadística	No se rechaza H_0
Conclusión	Se cumple el supuesto de normalidad. al tener una significancia del 5%.

E. Rendimiento térmico del GLP

Al ver la figura 7 de probabilidad normal se analiza que la dispersión de puntos aproximadamente presenta gran linealidad cercana a una resta por tanto existe normalidad en los datos.

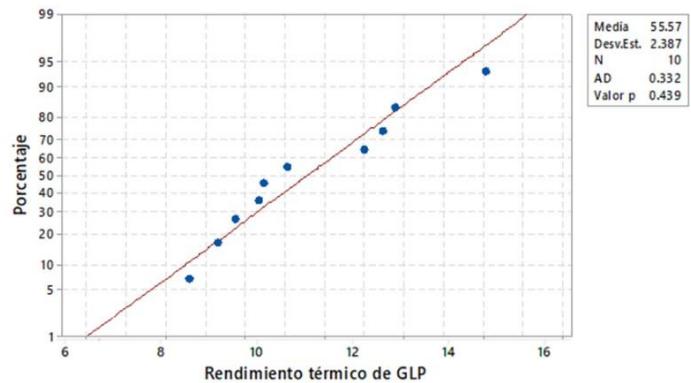


Fig. 7 Prueba estadística Anderson Darling – Rendimiento térmico GLP

En la tabla VIII, se observa que el valor estadístico de Anderson-Darling (AD) es cercano a 0, con valor 0.332 tiene y una probabilidad asociada p de 0.439 mayor al nivel de significancia 0.05, por lo tanto, no se tiene razón para rechazar la hipótesis nula y se concluye que: La distribución normal brinda un buen ajuste para la probabilidad de rendimiento térmico del GLP.

TABLA VIII
PRUEBA DE ARDERSON DARLING-RENDIMIENTO TERMICO GLP

Prueba estadística de Anderson-Darling (AD) AD = 0.332	
Hipótesis	H_0 = Los datos de rendimiento térmico se distribuyen normalmente. H_1 = Los datos de rendimiento térmico no se distribuyen normalmente.
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$
p	0.439
Desición estadística	No se rechaza H_0
Conclusión	Se cumple el supuesto de normalidad. al tener una significancia del 5%.

IV. CONCLUSIONES

Se llegó a producir entre 1.8 a 2 m³ de biogás por cada 100 L de carga diaria. Concluyéndose que es de gran importancia el manejo de temperatura, tiempo de retención y porcentaje de agua para la producción de un biogás de calidad. Se concluye de la investigación, que la variación de la temperatura ambiente no afecta de manera decisiva la temperatura del sistema, evidenciándose que la temperatura del biodigestor se mantiene constante a 19 °C a lo largo del proceso de digestión, a pesar de las variaciones ambientales térmicas producidas. Se concluye que la proporción de agua en función del estiércol, es de gran importancia para el arranque y carga diaria, evidenciándose que para la producción de biogás de calidad es necesario respetar estas proporciones y apoyarse de ensayos de humedad para garantizar la cantidad adecuada de agua que se utilizará. A partir de la comparación de los resultados se llega a concluir que el poder calorífico y el rendimiento térmico del biogás producido es diferente y menor al del gas licuado de petróleo, llegando a diferenciarse 89.46 kcal/m³ de poder calorífico y un rendimiento térmico diferenciado de 2.83 %. Finalmente se concluye que los niveles de poder calorífico y rendimiento térmico del biogás son funcionales para cualquier proyecto rural y urbano, brindando una propuesta confiable de optimización de sus residuos e implementación de técnicas limpias de producción de biogás.

A GRADECIMIENTO

A la Universidad Privada del Norte campus Cajamarca en Perú, para lograr concretar la investigación.

REFERENCIAS

- [1] Rojas, F; Jiménez, F; Ramos, B; Alván, R., Análisis experimental del rendimiento térmico, potencia y emisiones de cocinas anaeróbicas a gas licuado de petróleo para altitudes entre 2200 y 4200 metros. (Tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería, Sec. Ing. Mecánica, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. 2017.
- [2] Varnero, M. T., “Manual de Biogás”, Santiago de Chile. 2011.
- [3] Severiche C. y Acevedo R., “Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustibles de segunda generación,” Revista de la Facultad de Ingeniería. n° 28. p. 6,2014.
- [4] Silva, J. P., “Tecnología del biogás”, Cali. 2015.
- [5] Vega, J. A., “Diseño, construcción y evaluación de un biodigestor semicontinuo para la generación de biogás con la fermentación anaeróbica del estiércol de cuy y de conejo para la institución educativa Privada Cristiana Bereshi”, Universidad Nacional del Santa, Chimbote. 2015.
- [6] Roca J., EEUU espera que la producción de combustibles fósiles marque un nuevo récord en 2023. El periódico de la energía. 2022.
- [7] Téllez, C. A. Diseño y selección de elementos para una planta de biogás (Tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 2008.
- [8] De La Merced, D., Evaluación de los parámetros de un Biodigestor anaerobio tipo continuo (Tesis de Maestría). Universidad Veracruz, Veracruz, México. 2012.