



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

## ESCUELA DE POSGRADO

### DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE



#### TESIS

**PRODUCCIÓN DE METANO POR BIODIGESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS  
ORGÁNICOS EN LA CIUDAD DE PUNO: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL  
ENERGÉTICO Y LA EFICIENCIA PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA**

**PRESENTADA POR:**

**JOSE ANTONIO VARGAS MARON**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**PUNO, PERÚ**

**2024**

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

PRODUCCIÓN DE METANO POR BIODIGESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN LA CIUDAD DE PUNO: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO Y LA EFICIENCIA PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA

AUTOR

JOSE ANTONIO VARGAS MARON

RECuento DE PALABRAS

23295 Words

RECuento DE CARACTERES

118222 Characters

RECuento DE PÁGINAS

93 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

1.8MB

FECHA DE ENTREGA

May 10, 2024 3:37 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

May 10, 2024 3:39 AM GMT-5

● 13% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 11% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 9% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

  
LEONIDAS VILCA CALLATA  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
CIP N° 83278

  
Jared Augusto B. Callata  
CIP. 116625

Resumen



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO**  
**AMBIENTE**

**TESIS**

**PRODUCCIÓN DE METANO POR BIODIGESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS  
ORGÁNICOS EN LA CIUDAD DE PUNO: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL  
ENERGÉTICO Y LA EFICIENCIA PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA**



**PRESENTADA POR:**

**JOSE ANTONIO VARGAS MARON**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

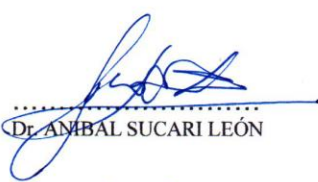
PRESIDENTE

  
.....  
Dr. LEONARDO PAYE COLQUEHUANCA

PRIMER MIEMBRO

  
.....  
Dr. FELIX QUISPE MAMANI

SEGUNDO MIEMBRO

  
.....  
Dr. ANBAL SUCARI LEÓN

ASESOR DE TESIS

  
.....  
D.Sc. LEONIDAS VILCA CALLATA

Puno, 31 de enero de 2024

**ÁREA:** Ciencias de la Ingeniería.

**TEMA:** producción de metano por biodigestión de residuos sólidos orgánicos en la ciudad de puno: evaluación del potencial energético y la eficiencia para generar energía eléctrica.

**LÍNEA:** Recursos Naturales y Medio Ambiente.



## DEDICATORIA

***A MIS PADRES:***

***JUAN DANIEL ( † ).***

***JUANA PASTORA.***



## AGRADECIMIENTOS

*A la Escuela de Post Grado de la Universidad Nacional del Altiplano. Quiero expresar mi sincero agradecimiento por brindarme la invaluable oportunidad de haber realizado mis estudios de doctorado en la Especialidad de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente y culminar con el presente trabajo de investigación que pongo a consideración del jurado evaluador y que me permita obtener el grado académico correspondiente. Ha sido un viaje educativo enriquecedor y estoy profundamente agradecido por el apoyo de Docentes, compañeros y el compromiso de excelencia académica que caracteriza a la comunidad Universitaria.*



## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
ACRÓNIMOS	ix
RESUMEN	1
ABSTRACT	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
INTRODUCCIÓN	3
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b>	
1.1 Marco teórico	6
1.1.1 Residuos sólidos urbanos (RSU)	6
1.1.2 Depósitos, residuos y sus impactos	6
1.1.3 Tipos de residuos sólidos	7
1.1.4 Residuos agrícolas	8
1.1.5 Biomasa	10
1.1.6 Gestión de los RSU	10
1.1.7 Generación de los residuos	11
1.1.8 Biogás	12
1.1.9 Composición del biogás	12
1.1.10 Efectos medioambientales de las emisiones de biogás	13
1.1.11 Producción de biogás	13
1.1.12 Utilización de biogás	16
1.1.13 Conversión de residuos en energía	16
1.1.14 Tecnologías de mejora del biogás	17
1.1.15 Tecnología de transformación termoquímica	18
1.1.16 Pirólisis	19
1.1.17 Gasificación	21
1.1.18 Conversión bioquímica	22
	iii



1.1.19	Digestión anaerobia	22
1.1.20	Compostaje	24
1.1.21	Conversión biológica	25
1.1.22	Combustible derivado de residuos (CDR)	25
1.1.23	Vertederos	26
1.1.24	Incineración	29
1.1.25	Producción y generación de electricidad a partir de biogás	30
1.1.26	Otros sistemas y estrategias	31
1.1.27	Otros aspectos de sostenibilidad	31
1.1.28	Reducción de las emisiones de CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O	32
1.2	Antecedentes	32
1.2.1	Internacionales	32

## **CAPÍTULO II**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

2.1	Identificación del problema	37
2.1.1	Descripción de la realidad problemática	38
2.2	Enunciados del problema	39
2.2.1	Problema general	39
2.2.2	Problemas específicos	39
2.3	Justificación	39
2.4	Objetivos	43
2.4.1	Objetivo General	43
2.4.2	Objetivos Específicos	43
2.5	Hipótesis	43
2.5.1	Hipótesis General	43
2.5.2	Hipótesis Específicas	43

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1	Lugar de estudio	44
3.2	Población	44
3.3	Muestra	45
3.4	Método de investigación	45
3.4.1	Tipo de investigación	45
3.4.2	El método propuesto	45



3.5	Descripción detallada del método por objetivos específicos	46
3.5.1	Evaluación de la cantidad y características de los Residuos Sólidos Orgánicos	46
3.5.2	Cálculo del potencial energético del biogás	48

#### **CAPÍTULO IV**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1	Resultados	50
4.1.1	Evaluación de la cantidad y características de los RSO	50
4.1.2	Evaluación del potencial energético	59
4.1.3	Contrastación de hipótesis	60
4.2	Discusión	64
	CONCLUSIONES	66
	RECOMENDACIONES	67
	BIBLIOGRAFÍA	68
	ANEXOS	75





## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Contenido de biogás	14
2. Características de los residuos	50
3. Cantidad de residuos no aprovechables	52
4. Generación de residuos sólidos	53
5. Generación de RSU en mercados	54
6. Análisis de la muestra	56
7. p valor hipótesis 1	62
8. Eficiencia vs Potencia generada	63
9. p valor hipótesis 2	64



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Residuos sólidos urbanos	7
2. Productos biológicos obtenidos a partir de residuos sólidos orgánicos	9
3. Etapas del proceso de digestión anaeróbica	16
4. Diagrama del lavado con agua circulante para la mejora del biogás	18
5. Esquema de la digestión anaeróbica	23
6. Ubicación de Puno	44
7. Representación esquemática (gasómetro + biodigestor)	47
8. Diagrama de flujo de equipo biodigestor	48
9. Características de los residuos	51
10. Residuos inorgánicos	51
11. Residuos no aprovechables	52
12. Generación de residuos sólidos	53
13. Generación de Residuos en mercados	54
14. Residuos compostificables	55



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Matriz de consistencia	75
2. Datos de campo	76
3. Panel Fotográfico	80



## ACRÓNIMOS

CH <sub>4</sub>	:	Metano
CO <sub>2</sub>	:	Dióxido de carbono
CO	:	Monóxido de carbono
CSTR	:	Fracción sólida en un reactor de tanque agitado continuo
CLB	:	Fracción líquida en un biodigestor de laguna cubierta
CLB	:	Biodigestor de laguna cubierta
CDR	:	Combustible derivado de residuos
°C	:	Grado centígrado
DA	:	Digestión anaeróbica
DBS	:	Incineración de lodos del lecho de secado
GEI	:	Producción de Gases de Efecto Invernadero
H <sub>2</sub>	:	Hidrógeno
H <sub>2</sub> S	:	Sulfuro de hidrógeno
HPT	:	Turbina de alta presión
m.s.n.m.	:	Metros sobre el nivel del mar
NH <sub>3</sub>	:	Amoníaco
kWh	:	Kilo Watt hora
kW	:	Kilo Watt
N <sub>2</sub>	:	Nitrógeno
N <sub>2</sub> O	:	Óxido nitroso
O <sub>2</sub>	:	Oxígeno
RSO	:	Residuos sólidos orgánicos
RSU	:	Residuos sólidos urbanos
UASB	:	Reactor de manta de lodos anaeróbicos de flujo ascendente

## RESUMEN

El crecimiento demográfico provoca un aumento de residuos sólidos urbanos, generando preocupaciones ambientales en ciudades como Puno. Es esencial considerar la biodigestión como una alternativa para mitigar estos efectos y además aprovechar la generación de metano como fuente de energía renovable. Los objetivos específicos incluyeron la caracterización de los residuos orgánicos y la evaluación del potencial energético del metano. El enfoque principal fue la biodigestión anaeróbica, un proceso que descompone materia orgánica en condiciones de ausencia de oxígeno, generando metano como subproducto. Se centro en residuos de alimentos, cascaras y restos de frutas y verduras, como principales componentes de la biomasa, recolectados en los mercados de la ciudad. Se empleo un enfoque de investigación cuantitativa descriptiva para recopilar datos específicos sobre la producción de metano, potencial energético y eficiencia en la generación de energía eléctrica. En cuanto a los resultados, el rendimiento del proceso de biodigestión es 41,5709 %, que permite producir un volumen de 734,6382 metros cúbicos de metano. El potencial energético calculado del metano producido es de 5142,6802 Kwh. (18513.65 Mega julios), subrayando la viabilidad de aprovechar residuos orgánicos para la generación de energía. La potencia eléctrica estimada es de 303,7 KW, que confirma la eficiencia del proceso, especialmente considerando la composición específica de la biomasa. Este estudio proporciona perspectivas valiosas para el desarrollo de estrategias sostenibles de gestión de residuos y generación de energía en la ciudad de Puno, resaltando la biodigestión anaeróbica como una solución prometedora y ambientalmente beneficiosa.

**Palabras clave:** Biodigestión, biomasa, energía eléctrica, metano, potencial energético.

## ABSTRACT

Population growth causes an increase in municipal solid waste, generating environmental concerns in cities such as Puno. It is essential to consider biodigestion as an alternative to mitigate these effects and also to take advantage of methane generation as a renewable energy source. The specific objectives included the characterisation of organic waste and the evaluation of the energy potential of methane. The main focus was on anaerobic biodigestion, a process that decomposes organic matter in the absence of oxygen, generating methane as a by-product. The focus was on food waste, fruit and vegetable peelings and leftover fruit and vegetables as the main biomass components, collected from the city's markets. A descriptive quantitative research approach was used to collect specific data on methane production, energy potential and efficiency in electricity generation. As for the results, the yield of the biodigestion process is 41.5709 %, which allows producing a volume of 734.6382 cubic metres of methane. The calculated energy potential of the methane produced is 5142.6802 kWh (18513.65 Mega Joules), underlining the feasibility of using organic waste for energy generation. The estimated electrical power is 303.7 KW, which confirms the efficiency of the process, especially considering the specific composition of the biomass. This study provides valuable insights for the development of sustainable waste management and energy generation strategies in the city of Puno, highlighting anaerobic biodigestion as a promising and environmentally beneficial solution.

**Keywords:** Biodigestion, biomass, electricity, energy potential, methane.



Dra. Ing. Ruth A. Meza Duman

## INTRODUCCIÓN

Ante el agravamiento de los problemas climáticos, las naciones dirigen sus esfuerzos a construir matrices de energías renovables. En lo que respecta específicamente a la biomasa, puede contribuir a la creación y el fortalecimiento de ventajas competitivas verdes en términos de costes para las unidades agrícolas (Araujo y Oliveira, 2023). Las soluciones consideran la producción de biogás como la principal vía de conversión de energía; las soluciones tecnológicas incluyen biodigestores, generadores de energía y sistemas combinados de calor y electricidad que suministran no sólo los servicios energéticos que demandan las explotaciones lecheras (gas de cocina, electricidad, refrigeración y agua caliente), sino también fertilizantes orgánicos. agua caliente), sino también fertilizantes orgánicos (Schneider et al., 2020).

La disponibilidad limitada de reservas de combustibles fósiles y problemas medioambientales como la contaminación atmosférica, la lluvia ácida, el calentamiento global, etc. Requiere la generación de energía a través de energía renovables. La biomasa es una de las mayores fuentes renovables de energía que se extrae de los materiales orgánicos y los recursos naturales (Almatrafi et al., 2022).

Los residuos biodegradables pueden tener repercusiones negativas el medio ambiente cuando se gestionan de forma inadecuada, sobre todo en vertederos (Varghese et al., 2023). El porcentaje de residuos alimentarios y verdes en los residuos sólidos urbanos (RSU) de los países de ingreso bajo y medio es muy elevado, constituyendo entre el 53% y el 57%. En estos países, el vertido es la opción más utilizada para eliminar los residuos (Saadoun et al., 2022).

Se denomina residuo a los materiales inútiles o subproductos que se desprenden de un proceso biodegradable o, de plantas o animales. Se pueden agrupar en diferentes formas como sólidos, líquidos, orgánicos, reciclables o peligrosos. Sin embargo, los residuos sólidos plantean importantes problemas a la humanidad, especialmente en las poblaciones urbanas. Los residuos sólidos orgánicos son de naturaleza heterogénea, con distintas características físicas y químicas. Entre ellas se incluyen el contenido de humedad, densidad, demanda química de oxígeno, sólidos totales, potencial de biometano, nitrógeno total, y fósforo total (Adetunji et al., 2023).

El aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> se ha convertido en uno de los principales problemas del mundo, más del 80% del consumo energético fósil a nivel mundial, lo que corresponde al 90% de las emisiones de las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de la actividad humana. El nivel atmosférico de CO<sub>2</sub> ha aumentado de 280 ppm en la era preindustrial a 410 ppm en 2018. El grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático ha informado de que sin tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, los costes para mantener los niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub> por debajo de 450 ppm se duplicarían de aquí al 2100 (Wang et al., 2022).

Las fuentes de energía convencionales como el carbón, el petróleo, el gas natural, etc., se utilizan para satisfacer la demanda energética ya que poseen un alto rendimiento energético (Ajay et al., 2021). La demanda mundial de energía ha aumentado en la última década debido a rápida globalización, el desarrollo de nuevas tecnologías y el crecimiento de la población, en 2018, el 86% de la demanda mundial de energía se cubrió por fuentes no renovables, principalmente por petróleo y carbón. Por lo tanto, este uso promueve el aumento de los niveles de gases de efecto invernadero en la atmósfera, intensificando diversos procesos de degradación ambiental, además supone una amenaza para la seguridad energética de los países, con el consiguiente agotamiento de las fuentes de energía tradicionales. La biomasa ha atraído cada vez más atención a lo largo de los años debido a su amplia disponibilidad y su coste decreciente (Oliveira et al., 2021).

El sector energético desempeña un papel dominante en el impulso de la economía de cualquier país; debido a estos retos, el uso de fuentes de energía renovables es cada vez más importante. En particular, la energía producida biológicamente como una alternativa atractiva a la creciente escasez de combustibles fósiles. Puede obtenerse combustible o electricidad a partir de fuentes de biomasa. El biogás generado por la acción de diferentes microbios mediante el proceso de digestión anaerobia ofrece un gran potencial de emplearlo como combustible rico en energía para diferentes aplicaciones. El rendimiento del biogás depende del tipo de materia prima. Las diferentes categorías de materias primas incluyen materia vegetal, residuos agrícolas, residuos de industrias alimentarias, lodos municipales y residuos domésticos de cocina (Ajay et al., 2021).

La presente investigación contiene cuatro capítulos; en el capítulo primero se efectuó la verificación de los temas relacionados y anteriores investigaciones; por lo que, consta del marco teórico y los antecedentes; en el capítulo segundo se identifica y





formula el problema de la investigación, también, la justificación, los objetivos y las hipótesis de la investigación; en el capítulo tercero se presenta el lugar de estudio, la población, la muestra, los métodos de investigación por cada uno de los objetivos específicos; en el capítulo cuarto se expone los resultados de la investigación conforme lo planteado por cada objetivo específico, principalmente se determinó que es posible la generación de energía a partir de los residuos sólidos orgánicos, se desarrolla la discusión, y se presenta las conclusiones y recomendaciones referidas al tema de investigación.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1 Marco teórico

##### 1.1.1 Residuos sólidos urbanos (RSU)

Los residuos sólidos urbanos son residuos recogidos en viviendas, algunas industrias escuelas, oficinas, comercios, etc. Estos residuos incluyen desechos como cartones periódicos, cartones, frutas, verduras, muebles, restos de comida, papeles, ropa, materia orgánica y artículos como envases de plástico, latas, etc. Cualquier material inútil, no deseado y desechado que resultan de la sociedad y de las actividades diarias normales se consideran RSU. (Kaur et al., 2021).

El problema de la eliminación de enorme cantidad de RSU generados y la necesidad de una fuente fiable de energía renovable son comunes en muchos países en vías de desarrollo. Los RSU provocan una grave contaminación ambiental, por lo que su uso como fuente potencial de energía renovable serviría para de satisfacer la creciente demanda de energía, así como la eliminación de residuos (Kumar y Samadder, 2017).

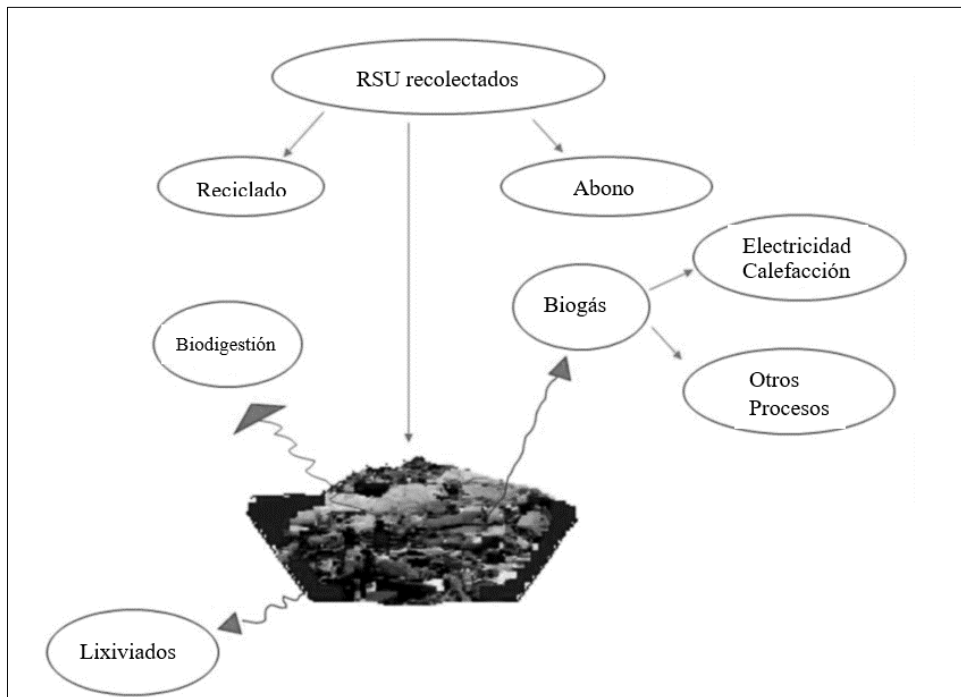
##### 1.1.2 Depósitos, residuos y sus impactos

La deposición inadecuada de RSU puede producir graves impactos sobre el ambiente, la salud pública además de la pérdida de materiales valiosos que pueden recuperarse economizando energía, materia prima y agua. Si se considera que los RSU se vierten como se hace habitualmente en la mayoría de los países en vías de desarrollo, las consecuencias de esta práctica sencilla y barata son desastrosas, la contaminación del aire por metano y dióxido de carbono, la producción de lixiviados que contaminan el suelo y las aguas subterráneas, además de pérdidas de material, energía y agua. Las mejoras se pueden incorporar para reducir la fuga de lixiviados y biogás cubriendo la parte superior con una capa de tierra y cubriendo la parte inferior con una capa de plástico. Un vertedero bien diseñado suele incorporar estos elementos para la recogida y drenaje del lixiviado generado, sistema de tuberías para la recogida de biogás y su posible uso

para la generación de electricidad o la combustión en antorcha minimizando los impactos negativos y alargando la vida útil del vertedero (Lino et al., 2023).

### Figura 1

#### Residuos sólidos urbanos



*Nota.* Tomado de “Municipal solid waste treatment in Brazil: A comprehensive review”, por F. Lino, K. Ismail y J. Castañeda-Ayarza, 2023. *Energy Nexus 11*(2023), p.3, <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100232>. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

#### 1.1.3 Tipos de residuos sólidos

Tres fuentes principales, como los residuos municipales, los de empresas e industrias y los de empresas de construcción y demolición, son las principales responsables de la generación de residuos. Entre ellas, los RSU desempeñan un papel fundamental en la generación de residuos sólidos a nivel mundial. Hay varios factores que influyen en las cantidades y la composición de los RSU. Entre ellos, la población, el crecimiento económico, la situación geográfica, el clima y las estructuras administrativas. Además, diversas variables financieras, demográficas y geográficas han estimulado el crecimiento de los residuos per cápita producidos en todo el mundo (Hasan et al., 2021).

Los residuos sólidos se clasifican en diferentes grupos, dependiendo de la fuente de origen y la propiedad. Según el origen, los residuos sólidos incluyen los residuos domésticos, los residuos institucionales, los residuos agrícolas, los residuos biomédicos, los residuos municipales y los residuos industriales. Sin embargo, según su propiedad, los residuos sólidos pueden ser residuos orgánicos, residuos inorgánicos, residuos biodegradables, residuos no biodegradables, residuos peligrosos y residuos no peligrosos. Otras formas de residuos sólidos son los residuos plásticos, los residuos radiactivos, los residuos de aguas residuales, los residuos mineros y los residuos de cenizas de basura (Adetunji et al., 2023).

Los residuos médicos, radiactivos, no se consideran RSU. Estos tipos de residuos se tratan por separado. Los RSU también pueden interpretarse como materiales sólidos, sub sólidos, líquidos y gaseosos resultantes de la actividad humana. Se componen de gran cantidad de residuos orgánicos biodegradables y materiales celulósicos como papel, cartón, alimentos, etc. Los RSU se pueden clasificar en siete categorías: residuos alimentarios, recortes de jardín, papel y cartón, metales, madera, plásticos y vidrio. Los restos de comida y los recortes de jardín se pueden compostar, mientras que los otros 5 pueden reciclarse y utilizarse para producir nuevos objetos. El compost puede utilizarse como abono orgánico en la agricultura y el material no descomponible se incinera o se envía a vertederos. En los últimos tiempos, la gestión de este tipo de residuos es lo más importante. Las técnicas incluyen la reducción, la recogida, el almacenamiento, el transporte y la eliminación de los RSU. Posteriormente, los residuos se separan y segregan en función de su tamaño. Posteriormente, los residuos se separan y segregan en función de su tamaño, cantidad y calidad. La composición de los residuos varía de un país a otro debido a los diferentes métodos de recogida y estilos de vida (Adetunji et al., 2023).

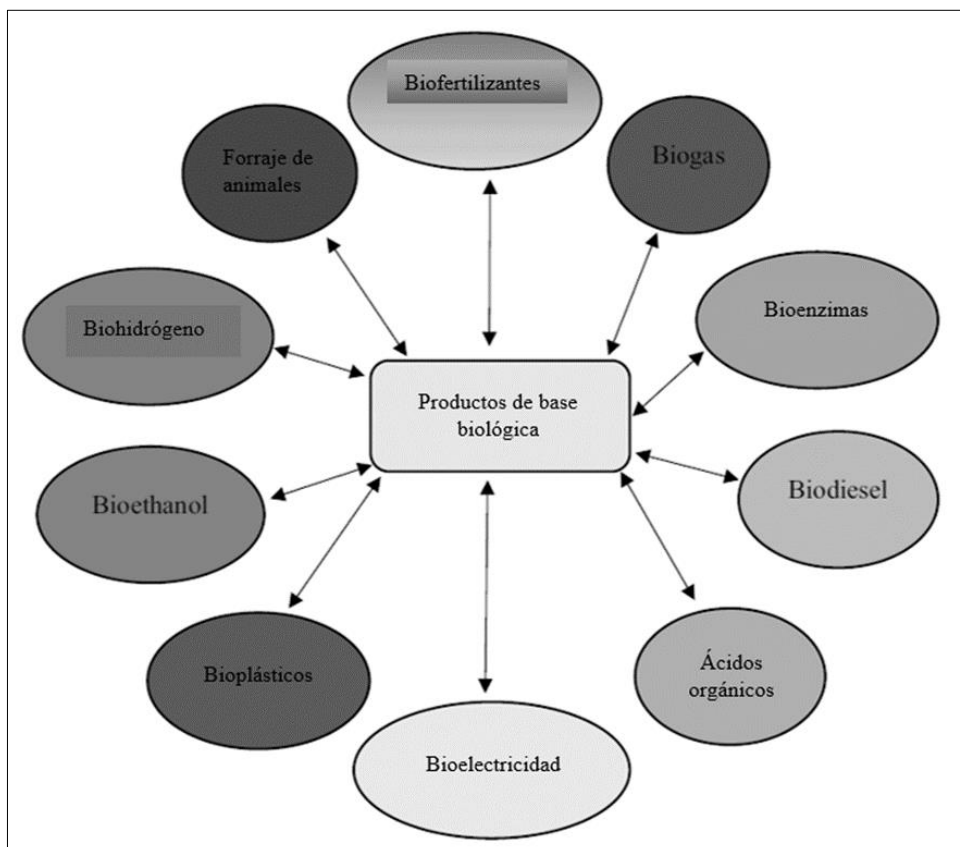
#### **1.1.4 Residuos agrícolas**

Los residuos agrícolas son materiales de desecho que se generan en los campos agrícolas y se componen principalmente de un 35-50 % de celulosa, un 25-30 % de lignina y un 25-30 % de hemicelulosa. Existen como residuos vegetales, residuos frutales (por ejemplo, cáscaras de fruta, bagazo de caña de azúcar) y residuos de cultivos. Las cáscaras de fruta se obtienen de plátanos,

naranjas, mangos papaya, piña, etc. Estos residuos de frutas, así como los residuos vegetales se transforman en abonos. El bagazo de caña de azúcar es una fibra seca obtenida tras la extracción del del jugo de la caña de azúcar. Los residuos de cultivos son materiales de desecho baratos materiales y fácilmente disponibles que se obtienen inmediatamente de las explotaciones agrícolas; incluyen paja de maíz, paja de arroz, paja de trigo, vainas de semillas hojas, etc. y constituyen una biomasa prometedora y de valor añadido para la producción de productos de base biológica (por ejemplo, bioetanol). Además, los residuos ganaderos, incluidos los pollos, la piel de los animales, la paja, el estiércol de vaca, etc. tienen un alto contenido en nitrógeno, lo que los hace utilizables como sustrato para la producción de biogás y biofertilizantes (Adetunji et al., 2023).

## Figura 2

*Productos biológicos obtenidos a partir de residuos sólidos orgánicos*



*Nota.* Tomado de “From garbage to treasure: A review on biorefinery of organic solid wastes into valuable biobased products”, por A. Adetunji, P. Oberholster y M. Erasmus, 2023. *Bioresource Technology Reports* 24(2023), p.2, <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101610>. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

### **1.1.5 Biomasa**

Biomasa es cualquier recurso renovable derivado de materia orgánica de origen animal o vegetal, existente en la naturaleza o generado por el hombre y/o animales, como residuos de actividades agrícolas e industriales y también residuos urbanos que pueden utilizarse como fuente alternativa de energía. La biomasa como insumo energético tiene una particularidad frente a otras fuentes: el resultado del proceso de conversión puede generar combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, lo que supone una ventaja frente a otras fuentes de energía, ya que otorga cierta flexibilidad de adaptación tecnológica según la necesidad (Ferreira et al., 2018).

### **1.1.6 Gestión de los RSU**

Los RSU se gestionan de muchas formas, como vertido, compostaje, reciclado incineración, pirólisis y gasificación. La selección de un método depende de muchos factores, como las fuentes y tipos de residuos, proveedores de servicios de gestión de residuos, equipamiento capacidad de tratamiento y ubicación. La gestión de los RSU en el pasado consistía en depositar los residuos en vertederos abiertos, seguidos de la quema a cielo abierto para reducir su volumen. Los residuos peligrosos procedentes de las industrias solían depositarse en vertederos abiertos o junto con la basura municipal. Como resultado, se crearon varios problemas medioambientales de estos antiguos vertederos, incluida la contaminación del suelo y las aguas subterráneas, humos tóxicos y emisiones de gases de efecto invernadero, y un mayor número de moscas y mosquitos causantes de diversas enfermedades (Hasan et al., 2021).

La gestión de los residuos implica una lista de actividades y medidas a adoptarse para minimizar las consecuencias perjudiciales de la acumulación de residuos en la salud de las personas y el medio ambiente. Estas actividades incluyen el almacenamiento, la recogida, la clasificación, el transporte y el tratamiento de residuos (con o sin recuperación de energía). Según la gestión de residuos sólidos el mejor método es adaptar la jerarquía de gestión de residuos que Incluye lo siguiente:

- Minimización o reducción de residuos, es decir, la reutilización de productos.
- Reutilización de materiales
- El reciclaje incluye separar los materiales reciclables como el plástico metales, vidrio y papel de los residuos y reprocesarlos en nuevos procesos.
- El procesamiento biológico incluye el compostaje de componentes de residuos degradables.
- Elaboración de compost a partir de materiales de desecho degradables.
- Incineración de residuos con o sin recuperación de energía.

La eliminación en tierra (vertedero) debe ser la solución si los residuos no pueden tratarse con los métodos mencionados. Los vertederos deben diseñarse de forma que se reduzca el impacto sobre el medio ambiente (Kaur et al., 2021).

### **1.1.7 Generación de los residuos**

Antes de seleccionar e implantar las tecnologías, es necesario conocer la cantidad de residuos generados sus características y composición (Kumar y Samadder, 2017) . En todo el mundo se producen anualmente más de 10.000 millones de toneladas de residuos sólidos, que en 2025 ascenderán a 14.800 millones de toneladas. Los estudios indican que, a medida que crece el producto interior bruto (PIB), suele aumentar la cantidad de residuos producidos. Por La generación de residuos per cápita también se ha visto incrementada por los cambios en demografía de la población (Hasan et al., 2021). La tasa de generación de residuos sólidos es directamente proporcional al Producto Interno Bruto (PIB) de los países en desarrollo. Los países fueron clasificados por el Fondo Monetario Internacional en países desarrollados y en vías de desarrollo en función del PIB per cápita. En países con un PIB per cápita superior a 10.000 dólares anuales se denominaron países desarrollados. En consecuencia, los países con Tecnologías de conversión térmica (Kumar y Samadder, 2017).

Los métodos y técnicas para recuperar energía de las aguas residuales incluyen producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica, incineración de biosólidos, pirólisis de biosólidos, tratamiento biotermoquímico de lodos, bombas

térmicas de calor, tecnologías bioelectroquímicas y producción de microalgas (Chrispim et al., 2021).

La conversión térmica implica el tratamiento térmico de la materia orgánica presente en los RSU para producir energía térmica, combustible o gas. La tecnología de conversión térmica suele ser útil para residuos secos (bajo contenido de humedad) con un alto porcentaje de materia orgánica no biodegradable. La incineración, que es una combustión controlada de residuos a alta temperatura es el método más utilizado en la tecnología de conversión térmica. Las otras tecnologías de conversión térmica (pirólisis y gasificación) todavía están en fase de investigación y no son viables para fines comerciales a gran escala, puede ser debido a la falta de datos adecuados de caracterización de los RSU, la mala calidad de las materias primas y el diseño inadecuado de las instalaciones (Kumar y Samadder, 2017).

### **1.1.8 Biogás**

Se espera que el biogás sea una de las futuras fuentes de energía renovable que se produce a través de la fermentación del metano en una digestión anaerobia, implica complejas interacciones microbianas en cuatro etapas biológicas y químicas principales, que son la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis. El acetato representa el 70% de  $\text{CH}_4$  en la producción de biogás, y el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2$  el 30%, mientras que el  $\text{CO}_2$  se produce en grandes cantidades a partir de las reacciones de acetogénesis y metanogénesis (Bahrún et al., 2022).

### **1.1.9 Composición del biogás**

El biogás se produce por la degradación de materiales orgánicos por microorganismos en condiciones anaeróbicas (en ausencia de oxígeno). En general, el biogás contiene un 50-80% de metano y un 20-50% de dióxido de carbono, pero durante el proceso de descomposición de la materia orgánica, ciertamente, algunos componentes secundarios como agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y nitrógeno ( $\text{N}_2$ ). Debido a la variedad de la composición de las fuentes de producción de biogás, la cantidad de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  en el biogás producido es diferente. El porcentaje de estos dos componentes en el biogás es un factor importante para su uso en diversas aplicaciones y la



composición del sustrato afectará directamente al rendimiento del biogás. En otras palabras, la energía final producida por el biogás viene determinada por la cantidad de metano en el biogás. Por ejemplo, cuando la fuente de biogás son sustancias aceitosas, el 70-75% de este biogás está compuesto de metano, sin embargo, este rango disminuye al 50-55% cuando la fuente de biogás es un hidrato de carbono. Así pues, el tipo de sustrato determina la composición del gas producido y su poder calorífico (Roozitalab et al., 2023).

#### **1.1.10 Efectos medioambientales de las emisiones de biogás**

Las emisiones de efecto invernadero incluyen gases como el metano, el dióxido de carbono óxido nitroso e hidrofluorocarbonos que contribuyen al calentamiento global y al cambio climático. La emisión de metano es 28-36 veces el potencial de calentamiento global en comparación con el dióxido de carbono. La emisión se produce cuando la materia orgánica se descompone y se produce biogás, cuyo principal componente es el metano. La emisión de metano también puede producirse cuando el biogás producido en biodigestores no se utiliza correctamente o si se deja escapar. Existen otros gases de efecto invernadero producidos durante la digestión anaeróbica de la materia orgánica, como el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno. El óxido nitroso es otro contaminante del biogás con un alto potencial de calentamiento global, aunque se libera en pequeñas cantidades. Por lo tanto, es importante que el biogás no se libere a la atmósfera evitando fugas en los sistemas de digestión y utilizando todo el biogás producido. Además, la purificación del biogás antes de su uso puede reducir la emisión de sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono y otros contaminantes. Una forma de minimizar la posibilidad de exceso de biogás procedente de digestores formales o de la putrefacción de depósitos orgánicos es diversificando sus aplicaciones (Mulu et al., 2021).

#### **1.1.11 Producción de biogás**

El biogás contiene gases liberados por el consumo anaeróbico de materia orgánica por parte de bacterias metanogénicas, lo que se denomina fermentación del metano. El proceso implica acciones microbianas metanogénicas anaeróbicas a partir de casi cualquier tipo de residuo orgánico. Los informes muestran que el metano y el dióxido de carbono son los principales componentes del biogás seco,

pero pueden incluir nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, sulfuro de hidrógeno, amoníaco e hidrocarburos. El biogás también puede contener trazas de azufre orgánico, cloro, flúor y compuestos de silicio junto con la emisión de aerosoles. Sin embargo, el contenido de biogás está muy influenciado por el sustrato y los parámetros del proceso. La generación de biogás proporciona una serie de beneficios como combustible, fertilizante de calidad, energía, calor, reutilización total de residuos, minimización de gases de efecto invernadero y evita la contaminación. El biogás es una alternativa flexible y fiable a los combustibles fósiles que subvenciona la generación. La tecnología del biogás se utiliza a gran escala en entornos urbanos y rurales. El biogás se produce utilizando una gran variedad de materias primas y reactores. La Tabla 1 presenta el contenido de biogás según diversos estudios (Emmanuel et al., 2022).

**Tabla 1***Contenido de biogás*

Componente	Fórmula	Porcentaje (%)
Metano	CH <sub>4</sub>	40-75
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	25-60
Monóxido de carbono	CO	0-0,1
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,5-2,5
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	1-3
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	0,1-0,5
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0,1-1
Amoníaco	NH <sub>3</sub>	0,1-0,5

*Nota:* Adaptado de “Evaluating the potential applications of brewers' spent grain in biogas generation, food and biotechnology industry: A review”, por J. Emmanuel, P. Nganyira y G. Shao, 2022. *Heliyon* 8 (2022), p.3, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11140>. [www.cell.com/heliyon](http://www.cell.com/heliyon)

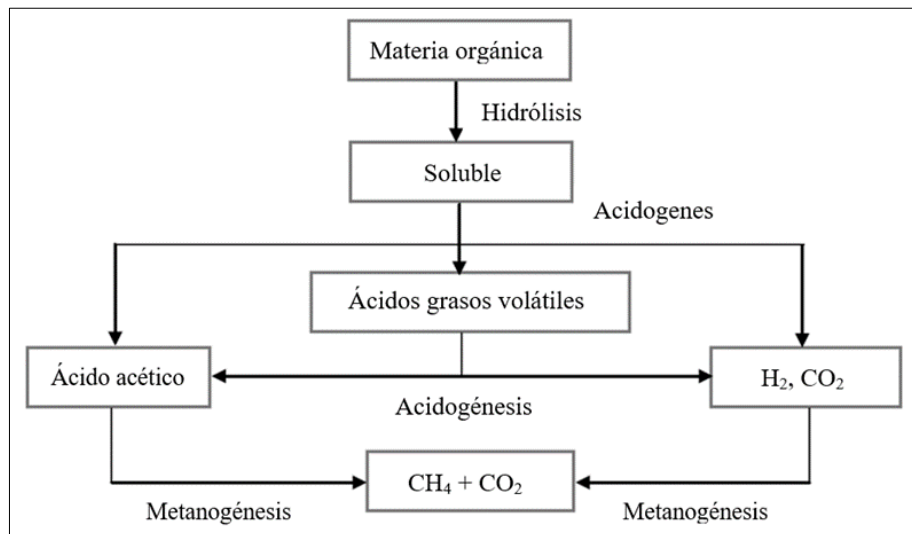
Las tres fuentes principales de producción de biogás son los residuos agrícolas, los vertederos y los residuos industriales y, como ya se ha mencionado, el biogás adecuado para la aplicación industrial debe tener un límite mínimo de metano y un límite máximo de concentración de dióxido de carbono. Por ejemplo, los residuos agrícolas dan lugar a un biogás que contiene entre un 50% y un 80% de metano, mientras que el metano máximo en el biogás producido a partir de residuos industriales es del 70% (Roozitalab et al., 2023).

Debido a la variada composición del biogás, que depende tanto del tipo de materia orgánica utilizada como de las condiciones en las que tiene lugar la biodigestión, su uso en motores de combustión interna supone todo un reto. Esto ocurre ya que requieren una calibración muy específica ligada al combustible para un funcionamiento aceptable. En este contexto, los motores de combustión externa, como el motor Stirling, que pueden trabajar con diferentes fuentes de calor, destacan y pueden ser una gran solución. Como el calor de la cámara caliente se transfiere al fluido de trabajo del motor a través de la conducción por las paredes y la convección entre las paredes y el fluido, la variación de potencia tiene un régimen transitorio lento en comparación con el motor de combustión interna, que responde rápidamente a las variaciones de potencia. Debido a esta dinámica, los motores Stirling han perdido espacio en las aplicaciones de la industria del automóvil, pero han crecido en otros ámbitos, como la generación de energía estacionaria. Recientemente, sistemas de micro generación con motores Stirling, operando con gas natural, biocombustibles y radiación solar, demuestran que el uso de este tipo de motores tiene ventajas ambientales y económicas, contribuyendo a la generación limpia y distribuida de energía eléctrica y térmica (Caetano et al., 2022).

La producción de biogás a partir del estiércol implica una serie de reacciones bioquímicas conocidas como digestión anaeróbica. El proceso comienza con la recolección y mezcla de estiércol con agua para crear un purín. El purín se transfiere a un digestor anaeróbico, normalmente un contenedor sellado o una planta de biogás. Dentro del digestor, los microorganismos descomponen la materia orgánica presente en el estiércol sin oxígeno, lo que da lugar a la producción de biogás. El proceso de digestión anaeróbica consta de varias etapas. La hidrólisis se produce cuando los compuestos orgánicos complejos se descomponen en sustancias más simples. A continuación, se produce la acidogénesis, en la que los ácidos orgánicos se degradan en ácidos grasos volátiles. En la siguiente etapa, la acetogénesis, los ácidos grasos volátiles se convierten en ácido acético e hidrógeno. Por último, se produce la metanogénesis, en la que las bacterias metanogénicas convierten el ácido acético y el hidrógeno en metano y dióxido de carbono, que constituyen los principales componentes del biogás (Bagdadee et al., 2023).

**Figura 3**

*Etapas del proceso de digestión anaeróbica*



*Nota.* Tomado de “A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste”, por A. Kumar y S. Samadder, 2017. *Waste Management* 69(2017), p.2, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>. Copyright 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1.1.12 Utilización de biogás

El vertido está muy extendido en los países en desarrollo para tratar y finalmente los RSU. El biogás liberado a la atmósfera, así como la intensa contaminación son algunos de los impactos negativos de este método. Sin embargo, el biogás tiene un importante potencial energético y beneficios medioambientales que no pueden descartarse. El potencial del metano es adecuado, puede sustituir al gasóleo y puede reducir significativamente los costes de combustible y las emisiones. (Lino et al., 2023).

### 1.1.13 Conversión de residuos en energía

Teniendo en cuenta el continuo aumento de los residuos sólidos generados por la población mundial y las eminentes amenazas para la salud pública y ambiental que se derivan de las prácticas inadecuadas utilizadas para el depósito final de los residuos por parte de las naciones en vías de desarrollo (Lino et al., 2023). Una cadena de suministro de residuos a energía no es sólo una forma útil de generar energía, sino que también ofrece una solución combinada para la

gestión de residuos y la emisión de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a lograr un medio ambiente verde y una economía próspera (Shah et al., 2021).

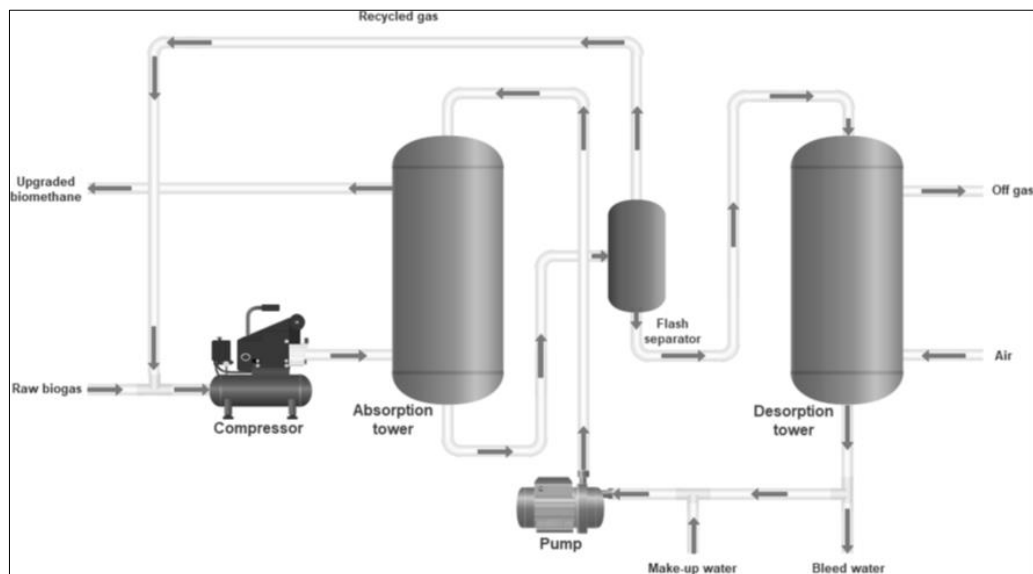
En los últimos años, el menor impacto en el medio ambiente y la mayor eficiencia son los objetivos, y varios estudios se realizaron y analizaron para evaluar el punto de vista termodinámico, medioambiental y económico de los sistemas de generación. El estudio de sostenibilidad muestra que los motores de combustión interna, las pilas de combustible, las microturbinas y las turbinas de gas son los más adecuados (Agonafer et al., 2022).

#### **1.1.14 Tecnologías de mejora del biogás**

La mejora del biogás consiste en eliminar el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del biogás. Para cumplir las especificaciones del mercado del biometano, el  $\text{CO}_2$ , que es el contaminante más importante del biogás, debe eliminarse en diversos grados para satisfacer la calidad del producto metano, que normalmente necesita una pureza de metano superior al 95%. El biogás mejorado tiene un mayor valor calorífico y se conoce como biometano como producto final del gas, similar a las especificaciones del gas natural. Las tecnologías de mejora del biogás se adaptan principalmente de la tecnología de descarbonización de la industria de refino de petróleo y gas. La planta de mejora del biogás añade costes de inversión y funcionamiento al proceso global de producción de biogás. Por ello, es esencial elegir la tecnología de mejora del biogás más adecuada. Los costes de mejora de las tecnologías establecidas dependen de la propia tecnología y, sobre todo, de la capacidad de la planta. En la actualidad, las tecnologías más empleadas para este fin son el lavado con agua, la absorción química y la permeabilización por membrana (Bahrun et al., 2022).

## Figura 4

Diagrama del lavado con agua circulante para la mejora del biogás



Nota. Tomado de “Carbon dioxide removal from biogas through pressure swing adsorption – A review”, por M. Bahrún, A. Bono, N. Othmana, M. Zaini, 2022. *Chemical Engineering Research and Design* 183(2022), p.290, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.05.012>. Copyright 2022 Institution of Chemical Engineers. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1.1.15 Tecnología de transformación termoquímica

Los métodos de conversión termoquímica emplean el principio básico de la descomposición de los residuos orgánicos por la acción del calor. Esto incluye la conversión de biomasa en biocombustibles. En raras ocasiones la conversión termoquímica implica una adición química, y dentro de un marco temporal limitado, puede hacer uso de una variedad de materias primas. Este grupo incluye procedimientos como la incineración, la pirólisis y la gasificación, entre otros (Shah et al., 2021).

El uso de tecnologías de transformación termoquímica como la pirólisis y la combustión es una de las opciones disponibles para generar biogás a partir de sustratos de biomasa que tiene valores caloríficos netos y brutos de 18,64 y 20,14 MJ/kg de masa seca, y es un sustrato de partida prometedor para la generación de calor mediante combustión. En este proceso, el contenido de humedad del sólido se reduce por debajo de 550 g/kg antes de la combustión a alta presión. Sin embargo, la combustión de sólido produce partículas y gases peligrosos que

contienen óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre en concentraciones entre 1000-3000 y 480 mg/m<sup>3</sup>. Otra opción interesante es utilizar el sólido para fabricar ladrillos de carbón vegetal. El proceso de fabricación comienza con el secado del sustrato acompañado del prensado y la carbonización en un entorno de oxígeno reducido. El contenido energético de los ladrillos de carbón vegetal generados mediante esta técnica es significativo (27 MJ/kg) y comparable al contenido energético del carbón vegetal fabricado a partir de otras materias primas como la madera, la caña de azúcar bagazo de uva, bagazo de aceituna y cáscara de avellana (Emmanuel et al., 2022).

La generación de electricidad mediante motores Stirling puede llevarse a cabo transformando en calor diferentes fuentes de energía, entre las que las más comúnmente utilizadas son la energía solar, los combustibles fósiles y los biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos, como fuente de calor para el motor Stirling. Sin embargo, al utilizar la energía solar como fuente de calor, la potencia producida fluctúa debido a la naturaleza estocástica e impredecible de la irradiación solar. Así pues, el uso de biocombustibles despierta el interés por ser una solución viable y renovable para la generación de energía en zonas rurales de donde la producción ganadera presenta un gran potencial como biocombustible (Caetano et al., 2022).

#### **1.1.16 Pirólisis**

La pirólisis tiene su origen en dos palabras griegas pyro y lysis (pyro significa fuego y lysis significa descomposición), es decir, descomposición del fuego. Se considera un tipo especial de termólisis. Es una conversión térmica para generar energía a partir de los RSU. La pirólisis es un proceso endotérmico en el que se proporciona calor para quemar los residuos. Se emplea comúnmente para material orgánico. El proceso de pirólisis tiene lugar en un entorno sin oxígeno y las partes vaporosas de la materia prima se vaporizan al calentarse. Se forman 3 productos principales que se mencionan a continuación (Kaur et al., 2021).

- Se obtienen vapores y estos vapores pueden convertirse en líquido (aceite y agua) mediante un proceso de condensación.
- Residuos que contienen carbón vegetal y cenizas, ricos en carbono, que pueden utilizarse para calefacción. que puede utilizarse para calefacción.

- Otros gases (CO, CO<sub>2</sub> y metano).

La pirólisis es el sistema de degradación térmica de residuos que se produce en ausencia total de aire y crea productos en tres estados como son residuos sólidos de carbono (biocarbón), líquido como en (bioaceite), y no condensables. Los productos de pirólisis varían en rendimiento y composición debido a diferentes parámetros, incluyendo la forma de la materia prima, el tipo de reactor, la composición, etc. (Shah et al., 2021).

La pirólisis es un proceso de transformación química que implica un proceso de destilación destructiva en un entorno carente de oxígeno. Los productos resultantes incluyen (a) un residuo sólido, (b) un componente líquido y (c) un subproducto gaseoso. Un ejemplo del proceso es la pirólisis de la celulosa, que puede describirse mediante la siguiente reacción química (Traven, 2023):



El producto sólido es carbono, el componente líquido es etileno, y el gas resultante es metano. Cada una de estas sustancias puede utilizarse como combustible.

Una variación de la pirólisis es la gasificación, en la que se suministra una cantidad limitada de oxígeno, ya sea en forma de oxígeno puro o de aire. Durante la oxidación posterior, se genera suficiente calor para mantener el sistema de forma independiente. En consecuencia, dependiendo de la cantidad de calor y oxígeno suministrados, la reacción puede ser exotérmica o endotérmica (Traven, 2023).

La pirólisis rápida requiere un calentamiento rápido a temperaturas que oscilan entre 400 °C y 600 °C y una extinción rápida de los vapores para reducir y controlar las reacciones secundarias. Los sólidos y líquidos obtenidos pueden utilizarse como purines de biogás para gasificación. A temperaturas de procesamiento más bajas y un tiempo de residencia del vapor más largo, se produce la formación de un producto sólido como el carbón vegetal. Cuando la temperatura de procesamiento es más alta y el tiempo de residencia de los vapores es más largo, se obtienen gases. Cuando la temperatura de procesamiento es más baja y el tiempo de



permanencia del vapor es más corto, se obtiene líquido. La pirólisis es el primer proceso químico que tiene lugar en la combustión (Kaur et al., 2021).

El intervalo de temperaturas utilizado durante el proceso de pirólisis varía entre 300 °C y 900 °C, siendo los intervalos más típicos los comprendidos entre 500 °C y 550 °C. A estas temperaturas los productos líquidos representan la mayor parte de los productos, mientras que a mayor temperatura el principal producto es el gas (Traven, 2023).

El proceso de pirólisis tiene varias aplicaciones, algunas de las cuales se mencionan a continuación (Kaur et al., 2021).

- Se utiliza en la industria química.
- Se utiliza para convertir la madera en carbón vegetal, carbón activado, metanol y otros productos químicos.
- Se utiliza para fabricar PVC convirtiendo el dicloruro de etileno en cloruro de vinilo.
- Convierte la biomasa en gas de síntesis.

Se utiliza en procedimientos culinarios como hornear, freír, asar y caramelizar.

Se creía que la pirólisis de los residuos sólidos urbanos tenía un gran potencial, ya que es un proceso prácticamente sin emisiones, por lo que tiene un excelente perfil medioambiental, que produce varios combustibles útiles. Por ello, se han realizado varios estudios para determinar el comportamiento de la pirólisis de varios componentes de los residuos sólidos urbanos (Traven, 2023).

### **1.1.17 Gasificación**

La gasificación implica el uso de calor y un entorno con oxígeno reducido para la oxidación parcial de materias primas basadas en el carbono para producir energía. En este proceso, con un suministro controlado de oxígeno y altas temperaturas, la materia prima de desecho se convierte en productos gaseosos. Esto ocurre a través de una serie de procesos que incluyen una combinación de gases combustibles, pequeñas cantidades de carbón, cenizas y gas de síntesis. Para generar gas enriquecido con hidrógeno, el proceso de gasificación puede ser una

estrategia eficaz y limpia. En general, los métodos de gasificación se clasifican por el tipo de gasificado y el medio de oxidación (Shah et al., 2021).

La gasificación se produce a una temperatura generalmente más alta que el pirólisis: 550-900 °C para la gasificación por aire y 1000-1600 °C si es oxígeno puro, gas enriquecido con oxígeno o vapor. Como materia prima valiosa, este proceso produce gas de síntesis, mientras que la formación de alquitrán es uno de los grandes problemas asociados a la gasificación. Alquitranes, halógenos y compuestos alcalinos se liberan en el producto gaseoso durante el proceso de gasificación y pueden causar problemas medioambientales y técnicos (Shah et al., 2021).

#### **1.1.18 Conversión bioquímica**

La conversión bioquímica implica el uso de microorganismos, sus enzimas asociadas, o una serie de productos químicos para lograr la utilización de la limitada gama de biomasa disponible. La productividad de este proceso es limitada, y un aumento de la productividad necesitaría mayor inversión de capital, como la instalación de reactores más grandes. Para aumentar el número de productos, se necesitan más cultivos microbianos adicionales y enzimas asociadas. El proceso es sensible a la temperatura ambiente y, en algunos casos, la exposición directa a la luz solar puede reducir el rendimiento del proceso. A menudo se producen lodos como producto de desecho secundario en este proceso (Shah et al., 2021).

#### **1.1.19 Digestión anaerobia**

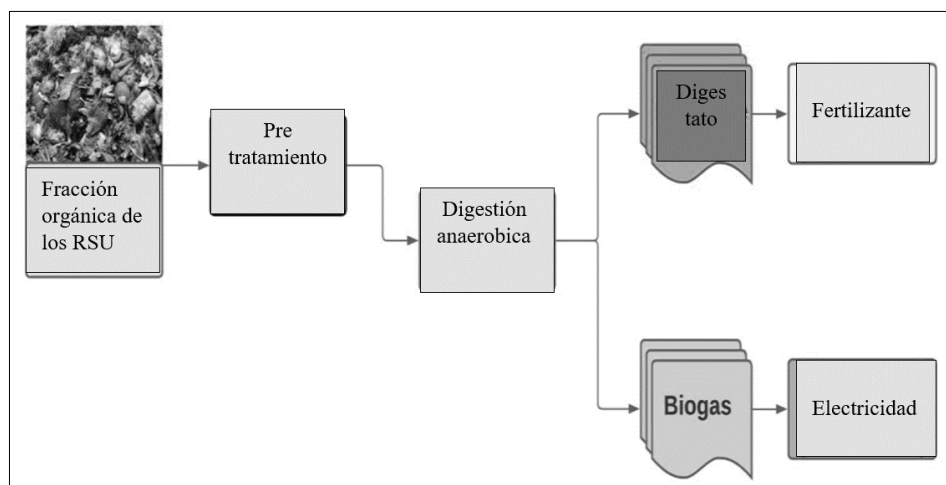
Se considera una fuente de energía renovable que puede sustituir a los combustibles fósiles. La electricidad puede producirse en un sistema totalmente cerrado, por lo que se reduce la emisión de gases nocivos. En este proceso la materia prima orgánica biodegradable (residuos de cocina) y la fracción orgánica combustible (papel, madera) presente en los RSU. digestor donde la digestión tiene lugar en un ambiente libre de oxígeno el agua se utiliza como reactivo. El biogás bruto producido por la digestión se utiliza para reducir los niveles de sulfuro de hidrógeno. Los altos niveles de sulfuro de hidrógeno provocan corrosión, por lo que los niveles de H<sub>2</sub>S deben controlarse antes de alimentar la

unidad de cogeneración y la caldera para evitar la corrosión y el buen funcionamiento del proceso de generación de electricidad. Cuando la demanda de calor y energía es mayor, la caldera suministra más calor. Para obtener biogás puro en CO<sub>2</sub> y sustancias indeseables se separan del biogás bruto. La composición del biogás obtenido cumple la norma del gas natural (Kaur et al., 2021).

La digestión anaeróbica requiere microorganismos para biodegradar materia orgánica en ausencia de oxígeno. El biogás rico en metano y el digestato cultivable son los principales resultados de la DA. Pero la digestión anaeróbica tradicional de lodos es insostenible debido al largo periodo de digestión, que conlleva un mayor consumo de energía. Para solucionar este problema, se tiene tecnologías de pretratamiento, como el mecánico, el químico, el biológico y el fisicoquímico. Esto ha aumentado la producción de metano y, en consecuencia, la producción de energía del proceso de AD también (Shah et al., 2021).

### Figura 5

*Esquema de la digestión anaeróbica*



*Nota.* Tomado de “Municipal solid waste as a sustainable resource for energy production: State-of-the-art review”, por A. Shah, V. Srivastava, S. Mohanty y S. Varjani, 2021. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9(2021), p.5, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105717>. Copyright 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

El proceso de digestión anaeróbica incluye (Kaur et al., 2021):

- Clasificación de residuos (se separan residuos como vidrio, plástico, metales) y trituración.

- Sistema de alimentación y retención en un bio reactor anaerobio en presencia de microorganismos que favorecen la acidogénesis y la metanogénesis
- Extracción del biogás del biorreactor y purificación (CO<sub>2</sub> y amoníaco se eliminan del sistema de metano producto)
- Manipulación del gas metano

La fracción orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se ha convertido en un sustrato idóneo para la AD, ya que es fácilmente accesible y tiene un alto contenido de humedad. Sin embargo, el rendimiento de metano de la digestión anaeróbica de lodos sigue siendo bajo en comparación con otros tipos de residuos orgánicos. La cogestión se ha identificado como una solución a este problema. En este proceso, se añade a los lodos un cosustrato con un alto potencial de metano, lo que ajusta diversos factores como el pH, la relación humedad, disponibilidad de nutrientes, etc. Además, la materia orgánica y los nutrientes de los residuos acaban transformándose en digestato, que se utilizan para el rendimiento de los cultivos (Shah et al., 2021).

El rendimiento de metano oscila entre 350 y 435 mL/g dependiendo de las condiciones operativas, los tipos de reactor, el tiempo de retención hidráulica y la configuración de los residuos. Es el método más adecuado para zonas de mangueras donde la generación de residuos es de baja a media (Kaur et al., 2021).

### **1.1.20 Compostaje**

El proceso de compostaje se centra en la degradación biológica aeróbica de la materia orgánica, creando residuos y estiércol estabilizados (Shah et al., 2021).

El compostaje es un proceso que utiliza microorganismos presentes en la materia orgánica y en el suelo para descomponer la materia orgánica. Estos microorganismos necesitan nutrientes básicos, oxígeno y agua para descomponer la materia orgánica. El compostaje pasa normalmente por tres fases: la mesofílica, o de temperatura moderada, que dura un par de días, la termofílica, o de alta temperatura, que puede durar desde unos pocos días hasta varios meses, y finalmente una fase de enfriamiento y maduración de varios meses. Los factores

que influyen en el proceso de compostaje son la concentración de carbono y nitrógeno en la materia orgánica, el volumen de la materia que se composta, la aireación de la cámara de compostaje y la temperatura de la materia orgánica. pila, el contenido de humedad dentro de la pila, la superficie de la pila y el tamaño de las partículas y, por último, la temperatura de la pila y, por último, la temperatura de la pila. El compost puede mejorar estructura del suelo mediante la adición de carbono y proporcionar nutrientes para las plantas como el nitrógeno, el fósforo y el potasio, además de mejorar las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo. Entre los posibles usos del del compost incluyen la reducción del uso de fertilizantes y pesticidas el suelo, prevenir la erosión, conservar el agua y mejorar el crecimiento de las plantas (Lino et al., 2023).

La materia orgánica de los RSU tiene numerosos beneficios medioambientales incluyendo la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la producción de compost que puede utilizarse como fertilizante orgánico. Además, el calor producido durante la descomposición puede utilizarse para la recuperación de energía. (Shah et al., 2021)

#### **1.1.21 Conversión biológica**

La conversión biológica es un proceso en el que la materia orgánica se descompone microbiológicamente en un entorno sin oxígeno y produce biogás. Los principales componentes del biogás son el metano y el dióxido de carbono. El compostaje y el vertido de RSU pueden utilizarse para extraer energía mediante conversión biológica. Los métodos de conversión bioquímica son más respetuosos con el medio ambiente que los métodos térmicos. Estos procesos se utilizan principalmente para los RSU y los residuos agrícolas, ya que estos tipos de residuos son difíciles de manipular debido a su alto contenido en humedad. En los países en los que las tasas de generación de residuos se sitúan entre baja y media, la conversión biológica es el método más apropiado (Kaur et al., 2021).

#### **1.1.22 Combustible derivado de residuos (CDR)**

Cuando los residuos recogidos se transportan en plantas, los grandes bloques de piedra y los materiales reciclables se clasifican manualmente en el vertedero. Los residuos restantes que es la fracción quemable se transforma en

CDR. La fracción inerte grande y los plásticos y metales reciclables se separan manualmente y el resto de los residuos mecánica. Se añade aire por debajo y los materiales incombustibles y los materiales inertes se separan de las fracciones combustibles ligeras. Por último, el material combustible se trocea y tritura manualmente en una pequeña fracción esponjosa llamada pelusa CDR. Las pelusas de CDR pueden utilizarse como combustible en una caldera para generar electricidad. Puede venderse a industrias que demandan energía como sustituto del carbón. Las pelusas de CDR se embalan para almacenarlas y transportarlas (Kaur et al., 2021).

### 1.1.23 Vertederos

El vertedero es el método tradicional y más barato de conversión biológica para obtener energía a partir de los RSU y está en práctica en muchos países. Los vertederos son áreas donde se reciben los residuos, se impermeabilizan y se sella la base junto con la nivelación del suelo para evitar la contaminación de las aguas subterráneas. Los vertederos se cubren con capas de tierra de entre 15 y 20 cm de altura para evitar la emisión de olores y gases desagradables. La basura que llega allí se compacta en capas dentro de un área pequeña llamada celda; esto reduce el espacio para los lodos y la dispersión de gases. Hay un sistema de drenaje adecuado para que los lixiviados no contaminen las aguas subterráneas. Una celda es un área pequeña dentro de la cual los residuos se comprimen en capas. Estas celdas disminuyen el volumen ocupado dentro de los vertederos. Esta práctica controla los olores, impide que los residuos se dispersen y mantiene alejadas a las alimañas y las ratas. El espacio depende del volumen y de la vida útil del vertedero. El volumen de una celda en un vertedero es de aproximadamente 15 metros de largo, 15 metros de ancho y 14 metros de alto. Puede acomodar 2500 toneladas de basura utilizando equipos pesados (cargadores, tractores, niveladoras y rodillos) que se mueven sobre la basura varias veces. Cuando la celda está completamente hecha se cubre con una gruesa capa de tierra (alrededor de 15 cm) y se vuelve a comprimir. Los materiales voluminosos como colchones, alfombras, etc. están excluidos de la mayoría de los vertederos (Kaur et al., 2021).

Durante la descomposición de la materia orgánica en los vertederos en condiciones anaeróbicas, se forma gas de vertedero que contiene

aproximadamente un 50 % de metano que puede capturarse y utilizarse para la producción de energía (Traven, 2023).

Los productos de la descomposición anaeróbica de los residuos son dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) (Traven, 2023).

La velocidad de descomposición en los vertederos depende de varios factores, como los niveles de humedad, la disponibilidad de nutrientes, el pH y la temperatura. Entre ellos, la cantidad de humedad accesible para la descomposición es el factor más importante. Este hecho ha contribuido a la práctica de recircular el lixiviado en el entorno del vertedero. Esta intervención tiene por objeto ajustar el contenido de humedad, acelerando así la cinética de descomposición y facilitar la producción y captura de metano (Traven, 2023).

La captura y utilización de gases de vertedero presenta claras ventajas medioambientales, económicas y energéticas. Normalmente, una vez capturado el gas se quema o se utiliza en un sistema de conversión de gas en energía para producir electricidad (Traven, 2023).

Para comprobar la contaminación procedente de los vertederos, se colocan tuberías alrededor de los vertederos para recoger muestras de las aguas subterráneas. Las tuberías están situadas en la base del vertedero y la base del vertedero está inclinada para que el lixiviado drene hacia estas tuberías. El revestimiento de plástico se coloca en el fondo del vertedero para que los lixiviados no contaminen el agua. Se libera gas metano, que puede recogerse y utilizarse para generar electricidad y calefacción. El agua subterránea pasa por debajo de la base inclinada del vertedero (Kaur et al., 2021).

El gas de vertedero suele enriquecerse eliminando el dióxido de carbono. Un proceso innovador para eliminar el  $\text{CO}_2$  del gas de vertedero es el uso de cenizas de fondo. Un estudio realizado con gas de vertedero una concentración de dióxido de carbono de entre el 70% y el 80% y ha demostrado a escala de laboratorio, que es posible reducir el contenido de dióxido de carbono a aproximadamente el 60% (Traven, 2023).



Hay muchos factores que deciden la cantidad de gas de vertedero incluido el metano. Los factores más importantes que ayudan a predecir la calidad de los vertederos son (Kaur et al., 2021):

- Composición de los residuos: se producirá más gas de vertedero si hay más residuos orgánicos en los vertederos. Cuantos más productos químicos se disponen en basurales más el compuesto orgánico no metano producido.
- Edad de la basura- más gas del terraplén se obtiene de más recientemente basura enterrada a través de volatilización, descomposición y reacciones químicas.
- Contenido de humedad- Cuanto mayor es el contenido de humedad en los RSU, más es la producción de gas.
- Temperatura- la actividad bacteriana es directamente proporcional a la temperatura del vertedero. Cuanto más es la temperatura, más es la actividad bacteriana y más producción de gas.

Cuando los RSU se depositan en un vertedero generan biogás. El lixiviado y gas de vertedero se produce al estabilizar los residuos sólidos en el vertedero que puede emplearse para calefacción y producción de electricidad (Kaur et al., 2021).

Cuando el sistema de digestión anaerobia se combina con el sistema de gas de vertedero se puede aumentar la producción total de gas metano y, por lo tanto la eficiencia de la producción (Kaur et al., 2021).

El número de vertederos está disminuyendo en los últimos tiempos, algunos países como Suiza, Alemania y Austria han prohibido el vertido de residuos no tratados en vertederos. Tiene varios problemas económicos y medioambientales que se mencionan a continuación (Kaur et al., 2021):

- Espacio limitado para vertederos.
- Elevados costes de transporte de los residuos a los vertederos, ya que no hay muchos lugares donde depositarlos, por lo que hay que transportarlos a distancias más largas.
- Contaminación de las aguas subterráneas.



- Emisión de gases de efecto invernadero.
- Elevado coste del enterramiento de residuos por falta de emplazamientos.

Para que el vertedero funcione correctamente y no cause problemas medioambientales, se adoptan las siguientes medidas (Kaur et al., 2021):

- El lixiviado es el líquido contaminado que drena del vertedero. Se produce a partir de la humedad presente en los residuos debido a la lluvia y la descomposición. Los lixiviados se recogen, eliminan o tratan para que no contamine las aguas subterráneas.
- Para el control de los lixiviados se sitúan muros de contención alrededor de los vertederos y se toman muestras diariamente para comprobar si los lixiviados se escapan a las aguas subterráneas.
- Para controlar los olores, las moscas y las alimañas, los vertederos se cubren con una capa de tierra de 15 cm de altura.
- Para controlar los gases liberados por los vertederos, existen celdas de control de gases que se colocan alrededor de los vertederos y en las que se toman muestras de gases que se colocan alrededor de los vertederos y se muestrean periódicamente.
- Para controlar el drenaje y la erosión, los vertederos se revisan periódicamente para evitar inundaciones (Kaur et al., 2021).

#### **1.1.24 Incineración**

La incineración es una tecnología bien establecida que ofrece un modelo barato para la extracción de energía térmica. En el proceso de incineración se hace reaccionar el componente combustible con el oxígeno en gases y cenizas. Principalmente implica la combustión controlada de residuos con recuperación de calor para producir vapor, que a su vez genera electricidad (Shah et al., 2021).

La incineración tiene muchos beneficios. La combustión o incineración consiste en quemar toda la masa de residuos en una incineradora. Este proceso de incineración de RSU reduce su volumen hasta un 80-90% (Kaur et al., 2021).

Las plantas de incineración de residuos con instalación de recuperación de energía que funcionan con RSU pretratados como combustible primario tienen un

factor de emisión neta de carbono ligeramente bajo (0,04-0,14 kg/MJ) en comparación con las centrales eléctricas basadas en combustibles fósiles (Kumar y Samadder, 2017).

Una pequeña superficie de instalación, un alto rendimiento y una mayor reducción del volumen de residuos es la razón por la que se prefiere este método. El rendimiento energético neto de este proceso viene determinado por la densidad, la composición, el contenido de humedad y el porcentaje de materiales inertes presentes en los residuos. La ceniza, un subproducto de la combustión de residuos sólidos normalmente inerte, puede utilizarse para fabricar cemento, materiales de construcción y otros productos. Las plantas de incineración requieren monitorización y tratamiento de los gases de escape, lo que conlleva elevados costes, convirtiéndose en uno de sus principales inconvenientes (Shah et al., 2021).

En primer lugar, los residuos que se van a quemar se introducen en una cámara de combustión. Durante este proceso se liberan gases contaminantes por lo que es necesario instalar un sistema de control de la contaminación. La incineración se realiza a una temperatura de 800 °C a 1000 °C en una caldera y el calor producido durante este proceso se utiliza para producir vapor. El vapor resultante se utiliza para hacer girar un generador de turbina para producir electricidad. El agua se evapora y luego baja a refrigeración mediante circulación natural. El vapor se separa del agua a través de la línea de separación en la caldera. A continuación, el vapor sobrecalentado pasa por la turbina de alta presión (HPT). La temperatura y la presión disminuyen tras la descarga de la HPT. A continuación, se vuelve a calentar para alcanzar la temperatura adecuada, el vapor pasa por la turbina y la turbina de baja presión. La turbina gira a gran velocidad. El eje de la turbina está acoplado al eje del generador, de modo que cuando la turbina gira, el eje del generador también produce electricidad (Kaur et al., 2021).

### **1.1.25 Producción y generación de electricidad a partir de biogás**

Los estudios han demostrado que el biogás puede producirse a partir de diversas materias primas mediante conversión termoquímica o bioquímica. La combustión directa del biogás y su uso en motores de combustión interna.

En el proceso de combustión directa, el biogás se quema en las cámaras de combustión de calderas, calentadores y secadores, y el calor liberado se utiliza en los procesos de producción. Por otro lado, el biogás puede quemarse en motores de combustión interna (motores de combustión interna o turbinas de gas) para producir electricidad o energía mecánica. Los motores de combustión interna convierten la energía del biogás en energía mecánica, que se utiliza directamente para alimentar una carga (una bomba, un ventilador, etc.) o un vehículo, o pueden conectarse a la moto generadora, que puede ser utilizado por propiedades rurales y agroindustriales para la generación de electricidad. Por lo tanto, los principales motores primarios utilizados para la producción de electricidad son los motores de combustión interna y las turbinas de gas (Freitas et al., 2019).

#### **1.1.26 Otros sistemas y estrategias**

Además de los biorreactores convencionales, existen otras técnicas o estrategias para la reducción del  $H_2S$  utilizando el metabolismo de bacterias quimiolitotóxicas. La desulfuración in situ utilizando la técnica de micro aireación ha demostrado ser factible y eficiente tanto a escala de laboratorio o a escala real que han logrado eficiencias de eliminación de hasta el 99 %. La principal ventaja de esta técnica es que evita la construcción e instalación de un nuevo sistema, y por tanto, los costes implícitos. Los principales inconvenientes de este método son la ligera reducción de los sólidos volátiles en suspensión disponibles para el metabolismo anaeróbico y la dilución del metano debido a la adición de nitrógeno al airear. Los sistemas bioelectroquímicos son otra técnica explorada recientemente utilizada para la desulfuración del biogás y la oxidación de sulfuros con la eliminación de sulfuro de hasta el 85%. Además de tratar las emisiones cargadas de sulfuro, las plantas que incorporan diseños de pilas de combustible microbianas pueden generar electricidad a partir de las reacciones de oxidación del sulfuro e incluso hidrógeno para la mejora del biogás hidrogenotrófico (Cattaneo et al., 2023).

#### **1.1.27 Otros aspectos de sostenibilidad**

Para determinar la sostenibilidad global de una tecnología de desulfuración de biogás, es necesario tener en cuenta varios indicadores, como el volumen del biorreactor y la demanda de suelo, la calidad del biogás, la demanda

de materiales y energía, el control del proceso y la mano de obra necesaria (Cattaneo et al., 2023).

### **1.1.28 Reducción de las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O**

Las emisiones de metano y óxido nitroso se generan en mayor o menor medida en función de las condiciones anaeróbicas dadas por el tipo de sistema de gestión del residuo orgánico. Este tipo de gestión del residuo orgánico puede ser sólido (apilamiento abiertos o cerrados), líquido (en lagunas abiertas o cubiertas); o utilizarse para la producción de biogás. El potencial de reducción anual de las emisiones de metano es la diferencia entre las emisiones generadas en el escenario actual, es decir, cuando no se aplica ninguna solución, y las emisiones generadas en el escenario propuesto, es decir, cuando se aplican soluciones novedosas. En este caso, la producción y utilización de biogás se considera la principal estrategia de control para la reducción de las emisiones de metano (Schneider et al., 2022)

## **1.2 Antecedentes**

### **1.2.1 Internacionales**

Richards y Yabar, (2023), nos menciona que el biogás es un valioso subproducto de los residuos agrícolas con muchos beneficios, como la producción de abono orgánico, reducción de emisiones y sustitución de la leña, lo que facilita la electrificación descentralizada. El análisis económico de la aplicación del biogás como fuente de energía para la generación de electricidad es necesario para motivar a los candidatos a usuarios (ganaderos) y para influir en la política gubernamental con el objetivo final es la mayor implementación del sistema de biogás para muchos propósitos y la reducción del consumo de fuentes de energía de combustibles fósiles (Wresta et al., 2015). El biogás, producido con los residuos de las granjas, alimenta estos generadores de energía. Se determinaron los costes nivelados del biogás para la cocina, la electricidad, la refrigeración y los fertilizantes (Villaruel-Schneider et al., 2020). Se evalúa teóricamente la generación de energía eléctrica a partir de biogás mediante un proceso de codigestión de bovino y porcino en biodigestores anaeróbicos. El análisis se realizó utilizando datos teóricos de la literatura sobre la producción diaria de

estiércol animal, donde la mejor generación cuantitativa de metano fue de 4 partes de estiércol bovino por 1 parte de estiércol porcino (Pinto et al., 2023).

Una de las mayores fuentes de energía disponibles en las zonas rurales y agroindustriales es la biomasa, que se encuentra en forma de residuos vegetales y animales, como los restos de desechos, el estiércol animal, los residuos energéticos y la biomasa. que se encuentra en forma de residuos vegetales y animales, como escombros, estiércol animal, plantaciones energéticas y efluentes agroindustriales. las plantaciones energéticas y los efluentes agroindustriales (Avaci et al., 2013). Analizar la generación de energía eléctrica derivada de la digestión anaeróbica de biogás y la incineración de lodos del lecho de secado (DBS) de un reactor de manta de lodos anaeróbicos de flujo ascendente (UASB) utilizando una planta de tratamiento de aguas residuales en Itajub'a, Minas Gerais, Brasil (Silva et al., 2023). Cuantificar el potencial energético del biogás producido a partir de la biodigestión anaerobia de residuos del proceso de extracción de aceite de oliva mediante la simulación de escenarios con datos reales de producción de aceite de oliva en las regiones Sur y Sudeste de Brasil, para el año 2018 (Vilas Bôas et al., 2023) .

La digestión anaerobica (DA) podría ser una metodología prometedora para convertir los bioresiduos en combustible sostenible para aplicaciones como generación de energía, calefacción, secado, refrigeración, etc. La enérgica modificación de las tecnologías las políticas gubernamentales, el comportamiento social y las aspiraciones económicas obligan a analizar estos factores para generar energía a partir de bioresiduos (Glivin et al., 2021). La electrificación portátil con baterías proporciona una fuente de energía asequible y evita los costes y las normativas asociadas a las líneas físicas de transmisión. En este trabajo, un sistema de digestión anaerobia consume residuos orgánicos y produce biogás que alimenta un generador eléctrico para cargar baterías. eléctrico para cargar baterías (Cherry et al., 2014).

Las empresas que adopten formas alternativas de energía podrán aumentar su competitividad y utilizar los residuos para generar energía, lo que supone un enfoque ecológico y eficiencia ecológica y económica (Walter Borges de Oliveira et al., 2011). El rendimiento energético y económico de varios sistemas de energía

que podrían aplicarse a las comunidades agrícolas y zootécnicas, contribuyendo así a los objetivos internacionales de desarrollo sostenible. Los sistemas energéticos propuestos incluyen tecnologías de eficiencia energética integradas y diseños de sistemas novedosos para alcanzar el objetivo de energía cero a nivel comunitario. a nivel comunitario, considerando acciones energéticas colectivas con provisión de beneficios para los miembros y partes interesadas (Maturó et al., 2021).

Se realiza el tratamiento de residuos de matadero municipal de Badajoz en España mediante un proceso de codigestión anaeróbica. El dispositivo experimental utilizado fue un biodigestor continuo de tipo completamente mixto (6 l de capacidad) con recirculación del metano producido en la digestión anaeróbica. En condiciones mesófilas (37 °C), se analizó la degradación biológica anaeróbica, la producción de biogás y los procesos de inhibición para seis caudales: 200, 275, 350, 400, 537 y 672 ml/día. Se comprobó que el caudal ambiental óptimo de 350 ml/día para la producción de energía (Marcos et al., 2012). Se presenta un estudio de caso sobre los métodos de separación sólido-líquido (SLS) para la recuperación de biogás de estiércol porcino en un sistema configurado para tratar la fracción sólida en un reactor de tanque agitado continuo (CSTR) y la fracción líquida en un biodigestor de laguna cubierta (CLB) a gran escala. biodigestor de laguna cubierta (CLB) a gran escala (Tápparo et al., 2021).

Se realizan predicciones numéricas del rendimiento de las SOFC que operan con biogás con el fin de evaluar el uso potencial del biogás producido a partir de diferentes fuentes orgánicas procesadas en biodigestores como combustible para las SOFC. El rendimiento de la SOFC se predice numéricamente utilizando un código CFD no comercial completamente tridimensional llamado DREAMSOFC. El análisis se centra principalmente en el efecto de la composición del biogás sobre el rendimiento de la pila de combustible. Se utilizan diferentes composiciones de biogás como combustible suministrado a la SOFC y la concentración de las especies en el biogás son las medidas mediante un sistema de cromatografía de gases del biogás producido en biodigestores instalados en la Universidad de Guanajuato (Elizalde-Blancas et al., 2013). Se presenta una evaluación técnico económica de la producción de bioenergía y fertilizantes mediante digestión anaeróbica (DA) de granos usados de cervecía (BSG).

digestión anaeróbica (DA) de granos usados de cervecería (BSG). Las simulaciones se realizaron integrando la producción de biometano, electricidad, energía térmica y fertilizantes para cinco condiciones de ingresos (Sganzerla et al., 2021).

La generación de energía eléctrica distribuida en las zonas rurales de Brasil contribuye al suministro y la logística de la producción de energía en todo el país. Este trabajo tiene por objeto analizar la producción de biogás a partir de residuos vinícolas y la generación de energía eléctrica con biogás como fuente primaria (Souza et al., 2013). El crecimiento del sector del azúcar y el alcohol en Brasil ha provocado un aumento significativo de la producción de vinaza, lo que agrava el problema de su destino. La biodigestión anaerobia es una alternativa para el tratamiento de este subproducto. La biodigestión anaerobia es una alternativa para el tratamiento de este subproducto, que presenta un factor económico relevante: su uso como fuente de energía (Nogueira et al., 2015).

Se ofrece una visión global y una evaluación de las materias primas y las biotecnologías aplicables que son viables en el África subsahariana en función de su escala y aplicación (doméstica, comunitaria, institucional y comercial). Además del estiércol, entre las materias primas adecuadas para los biodigestores domésticos, comunitarios e institucionales se incluyen los residuos agrícolas, y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (Rupf et al., 2016). Se presenta una revisión detallada del potencial energético de la biomasa residual para generación distribuida en Brasil, presentando el potencial por macrorregión de los diferentes tipos de residuos generados en los sectores agrícola agrícolas, forestales, pecuarios, industriales y urbanos. El foco de esta investigación es mapear y señalar, a través de investigación bibliográfica, el gran potencial de la biomasa en el mercado brasileño para la producción de biogás y consecuentemente el uso para generación de energía eléctrica en el país y especialmente en el estado de Paraná (Ferreira et al., 2018).

La biomasa es una fuente de energía potencial para la diversificación de la matriz energética brasileña. En este contexto, el biogás producido a partir de la digestión anaeróbica de residuos es un recurso renovable relevante que desempeña un papel significativo en la mitigación de los problemas ambientales y en la



generación local de energía eléctrica. en la mitigación de problemas ambientales y en la generación local de energía eléctrica (Freitas et al., 2019). La gasificación de la biomasa produce syngas mediante la conversión química de la materia prima en presencia de aire, oxígeno y/o vapor. El gas de síntesis resultante puede quemarse en un ciclo de turbina de gas para la generación de energía o procesado posteriormente para producir biocombustibles de segunda generación. Por tanto, la biomasa La gasificación ha sido objeto de gran atención, ya que puede desempeñar un papel importante en el difícil panorama energético actual al proporcionar la energía necesaria para satisfacer el continuo aumento de la demanda energética y mitigar el cambio climático. energía necesaria para satisfacer el continuo aumento de la demanda energética y mitigar el cambio climático (Almatrafi et al., 2022).



## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1 Identificación del problema

Considerando el notable crecimiento demográfico, el incremento de los residuos sólidos urbanos es una de las principales problemáticas ambientales en la actualidad en las grandes ciudades del país, en la región y específicamente en la ciudad de Puno. Por lo que es necesario buscar alternativas que permitan mitigar estos efectos.

En la Ciudad de Puno, ubicada a 3850 msnm en la región Puno, se generan diariamente grandes cantidades de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) orgánicos, los cuales representan un desafío ambiental y de gestión. Sin un tratamiento adecuado, estos residuos pueden contribuir a problemas de contaminación y salud pública. Sin embargo, estos desechos tienen un potencial energético que podría aprovecharse para la generación de metano y, consecuentemente, energía eléctrica.

A pesar de este potencial en residuos orgánicos, la falta de sistemas sostenibles de gestión y aprovechamiento energético de estos residuos representa un problema significativo en la ciudad. La disposición en vertederos y la ausencia de una estrategia integral para la valorización de residuos orgánicos no solo resultan en la pérdida de recursos valiosos, sino que también generan emisiones de gases de efecto invernadero.

Este contexto plantea la necesidad de abordar el problema de la gestión ineficiente de los RSU orgánicos en Puno, con un enfoque en la implementación de sistemas de biodigestión como una solución para la generación de energía eléctrica a partir de estos residuos. Sin embargo, para lograr una implementación efectiva de esta tecnología, es necesario abordar una serie de desafíos técnicos, económicos, ambientales y sociales que se derivan de esta iniciativa.

Los residuos sólidos orgánicos (RSO) provienen principalmente de desechos de alimentos, restos de plantas y otros materiales biodegradables. Cuando se descartan y se dejan descomponer a cielo abierto, tienen varios impactos ambientales:

Producción de Gases de Efecto Invernadero (GEI): La descomposición anaerobia (sin oxígeno) de RSO en vertederos produce metano, un gas de efecto invernadero que es

aproximadamente 25 veces más potente que el dióxido de carbono en términos de calentamiento global durante un período de 100 años.

**Contaminación del Aire:** La descomposición a cielo abierto puede generar malos olores y la liberación de compuestos orgánicos volátiles (COV), afectando la calidad del aire circundante.

**Contaminación del Suelo y del Agua:** Los líquidos producidos durante la descomposición, llamados lixiviados, pueden contaminar el suelo y los recursos hídricos si no se gestionan adecuadamente. Los lixiviados contienen sustancias tóxicas que pueden ser perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente.

**Afectación a la Fauna:** Los vertederos a cielo abierto atraen plagas y otros animales, como ratas y aves, lo que puede desequilibrar ecosistemas locales y propagar enfermedades.

**Pérdida de Recursos:** Los RSO pueden ser reciclados o compostados para producir compost, que es beneficioso para el suelo y reduce la necesidad de fertilizantes sintéticos. Al desecharlos a cielo abierto, se pierde la oportunidad de reutilizar estos valiosos recursos.

Para mitigar estos impactos, es esencial adoptar prácticas como el compostaje, la digestión anaerobia (para capturar y usar el metano producido) y la segregación en origen. Al reducir la cantidad de RSO que se desecha a cielo abierto y promover su reciclaje o reutilización, se pueden minimizar sus impactos ambientales negativos.

### **2.1.1 Descripción de la realidad problemática**

Las fuentes de energía se han convertido en un foco de presiones legales, éticas, sociales y económicas debido a crecientes problemas medioambientales. Las fuentes de energía no renovables se renovables y menos contaminantes, con tecnologías orientadas a la sostenibilidad (Oliveira et al., 2011). Existe una fuerte correlación entre electrificación y aumento del desarrollo humano, pero en los países en desarrollo el acceso a la electricidad es a menudo poco fiable, no está disponible o no se puede obtener, especialmente de una red eléctrica centralizada (Cherry et al., 2014).

## 2.2 Enunciados del problema

De acuerdo a lo descrito nos planteamos la siguiente interrogante:

### 2.2.1 Problema general

¿Cuál es la relación entre la producción de metano por biodigestión de Residuos Sólidos Orgánicos, su potencial energético y la eficiencia para generar energía eléctrica en la Ciudad de Puno?

### 2.2.2 Problemas específicos

¿Cuál es las características y cantidad de residuos sólidos orgánicos recolectados en la Ciudad de Puno, cómo influyen en la producción de metano a través del proceso de biodigestión?

¿Cuál es el potencial energético del metano producido y cómo se relaciona con la eficiencia para generar energía eléctrica sostenible a nivel local?

## 2.3 Justificación

El sector energético desempeña un papel dominante en el impulso de la economía de cualquier país, debido a estos retos, el uso de fuentes de energía renovables es cada vez más importante; en particular, la energía producida biológicamente como una alternativa atractiva a la creciente escasez de combustibles fósiles (Ajay et al., 2021). Las fuentes de energía se han convertido en un foco de presiones legales, éticas, sociales y económicas debido a crecientes problemas medioambientales. Las fuentes de energía no renovables y menos contaminantes, con tecnologías orientadas a la sostenibilidad. Las empresas que adopten formas alternativas de energía podrán aumentar su competitividad y utilizar los residuos para generar energía, lo que supone un enfoque ecológico y eficiencia ecológica y económica (Oliveira et al., 2011).

El porcentaje de residuos alimentarios y verdes en los residuos sólidos urbanos (RSU) de los países de ingresos bajos y medios es muy elevado, constituyendo entre el 53% y el 57% (Saadoun et al., 2022). Se denomina residuo a los materiales inútiles o subproductos que se desprenden de un proceso biodegradable de plantas o animales, se pueden agrupar en diferentes formas como sólidos, líquidos, orgánicos, reciclables o

peligrosos; sin embargo, los residuos sólidos plantean importantes problemas a la humanidad, especialmente en las poblaciones urbanas (Adetunji et al., 2023).

La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y el combustible derivado de residuos son materias primas atractivas para la biorrefinería y la biotecnología para aplicaciones en diversos mercados energéticos (Varghese et al., 2023). Los contaminantes orgánicos y los patógenos microbianos contaminan el suelo y las fuentes de agua de la región cercana. Se ha sugerido que la digestión anaerobia es la forma más prometedora para el reciclaje de energía, puede producir biogás rico en  $\text{CH}_4$  a partir del flujo orgánico. Los residuos líquidos y sólidos, denominados digestato se utilizan como fertilizantes (Yang et al., 2022).

La biomasa es cualquier recurso renovable derivado de materia orgánica de origen animal o vegetal, existente en la naturaleza o generado por el hombre y/o animales, como residuos de actividades agrícolas e industriales y también residuos urbanos que pueden utilizarse como fuente alternativa de energía. La biomasa como insumo energético tiene una particularidad frente a otras fuentes: el resultado del proceso de conversión puede generar combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, lo que supone una ventaja frente a otras fuentes de energía, ya que otorga cierta flexibilidad de adaptación tecnológica según la necesidad (Ferreira et al., 2018).

El biogás producido a partir de la digestión anaeróbica de residuos es un recurso renovable relevante que desempeña un papel significativo en la mitigación de los problemas ambientales y en la generación local de energía eléctrica. en la mitigación de problemas ambientales y en la generación local de energía eléctrica (Freitas et al., 2019). La biomasa es una de las mayores fuentes renovables de energía que se extrae de los materiales orgánicos y los recursos naturales, dependiendo de la potencialidad de los diferentes países, varios materiales de biomasa son conocidos como fuentes renovables para la producción de combustible. Debido a que la emisión neta de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la biomasa es cero, es limpia en comparación con otras fuentes de energía. Entre los diferentes procesos termoquímicos disponibles para la conversión de biomasa en biocombustibles, la gasificación se percibe como una de las rutas más prometedoras, ya que convierte la materia prima muy eficientemente en un gas de alta densidad energética compuesto por  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y otros en menor medida (Almatrafi et al., 2022).

Una de las mayores fuentes de energía disponibles en las zonas rurales y agroindustriales es la biomasa, que se encuentra en forma de residuos vegetales y animales, como los restos de desechos, el estiércol animal, los residuos energéticos y la biomasa, estos residuos pueden ser utilizados por los productores rurales o por las agroindustrias para la combustión directa, con el fin de producir biogás en biodigestores (Avaci et al., 2013). La digestión anaeróbica podría ser una metodología prometedora para convertir los bioresiduos en combustible sostenible para aplicaciones como generación de energía, calefacción, secado, refrigeración, etc. La enérgica modificación de las tecnologías las políticas gubernamentales, el comportamiento social y las aspiraciones económicas obligan a analizar estos factores para generar energía a partir de bioresiduos (Glivin et al., 2021).

Ante el agravamiento de los problemas climáticos, las naciones dirigen sus esfuerzos a construir matrices de energías renovables, en lo que respecta específicamente a la biomasa, puede contribuir a la creación y el fortalecimiento de ventajas competitivas verdes en términos de costes para las unidades agrícolas (Araujo y Oliveira, 2023). Las soluciones consideran la producción de biogás como la principal vía de conversión de energía; las soluciones tecnológicas incluyen biodigestores, generadores de energía y sistemas combinados de calor y electricidad que suministran no sólo los servicios energéticos que demandan las explotaciones lecheras (gas de cocina, electricidad, refrigeración y agua caliente), sino también fertilizantes orgánicos (Schneider et al., 2022).

Existe una fuerte correlación entre electrificación y aumento del desarrollo humano, pero en los países en desarrollo el acceso a la electricidad es a menudo poco fiable, no está disponible o no se puede obtener, especialmente de una red eléctrica centralizada. La electrificación portátil con baterías proporciona una fuente de energía asequible y evita los costes y las normativas asociadas a las líneas de transmisión físicas, un sistema de digestión anaeróbica consume residuos orgánicos y produce biogás que alimenta un generador eléctrico para cargar baterías (Cherry et al., 2014).

Por lo tanto, la investigación está plenamente justificada por lo siguiente:

- Impacto Ambiental: La gestión ineficiente de los residuos orgánicos contribuye significativamente a la contaminación del aire, el suelo y el agua. Además, la disposición de estos residuos en vertederos libera metano, un poderoso gas de

efecto invernadero. Investigar la biodigestión como una forma de valorización energética puede reducir la contaminación ambiental y la emisión de gases de efecto invernadero.

- Recursos Energéticos Desaprovechados: Los RSU orgánicos son una fuente rica en energía potencial, especialmente en forma de metano. Aprovechar este recurso para generar electricidad puede contribuir a la diversificación de la matriz energética y la reducción de la dependencia de fuentes no renovables.
- Necesidades Energéticas de la Ciudad: La ciudad de Puno y sus habitantes tienen necesidades energéticas que deben ser satisfechas de manera eficiente y sostenible. La generación de electricidad a partir de RSU orgánicos podría contribuir a la oferta de energía local.
- Sostenibilidad y Desarrollo Regional: La implementación de sistemas de biodigestión no solo tiene beneficios ambientales y energéticos, sino que también puede promover el desarrollo económico y social en la ciudad de Puno al crear empleos locales y reducir costos asociados con la gestión de residuos.
- Avance del Conocimiento: La investigación en este campo puede generar conocimiento valioso sobre la viabilidad técnica, económica y ambiental de la biodigestión de RSU orgánicos en contextos específicos, lo que puede ser útil para otras regiones con desafíos similares.
- Políticas y Decisiones Informadas: Los resultados de la investigación pueden servir como base sólida para la formulación de políticas y la toma de decisiones informadas por parte de las autoridades locales y regionales en Puno en relación con la gestión de residuos y la generación de energía,

Al evaluar la eficiencia de la producción de metano de los RSU orgánicos de Puno y su potencial energético, este proyecto busca ofrecer una solución doblemente beneficiosa: por un lado, contribuir a la gestión sostenible de los residuos, reduciendo su impacto ambiental, y por otro, generar una fuente de energía renovable que puede contribuir a satisfacer las necesidades eléctricas de la región.

La ejecución de este proyecto podría sentar las bases para futuras iniciativas que combinen la gestión de residuos y la producción de energía en otras ciudades del país, potenciando una economía circular y sostenible. Además, se alinearía con los objetivos de desarrollo sostenible y las metas nacionales de reducción de emisiones de carbono. Por

todo ello, es esencial llevar a cabo esta investigación y explorar el potencial real de los RSU orgánicos de Puno en la generación de energía eléctrica.

## **2.4 Objetivos**

### **2.4.1 Objetivo General**

Evaluar la relación entre la producción de metano por biodigestión de Residuos Sólidos Orgánicos, su potencial energético y la eficiencia para generar energía eléctrica en la Ciudad de Puno.

### **2.4.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar la cantidad y características de los Residuos Sólidos Orgánicos para determinar la producción de metano por biodigestión en la Ciudad de Puno.
- Evaluar el potencial energético del metano producido y su viabilidad para la eficiente generación de energía eléctrica sostenible a nivel local.

## **2.5 Hipótesis**

### **2.5.1 Hipótesis General**

La biodigestión de los Residuos Sólidos Urbanos orgánicos recolectados en la Ciudad de Puno representan cantidades significativas para producir metano, lo cual se traduzca en un potencial energético viable para generar energía eléctrica, en forma eficiente.

### **2.5.2 Hipótesis Específicas**

- La cantidad de los Residuos Sólidos orgánicos recolectados en la Ciudad de Puno tiene las características adecuadas para ser transformados en metano a través del proceso de biodigestión.
- El potencial energético del metano producido, se relaciona con la capacidad eficiente para generar energía eléctrica sostenible a nivel local.



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Lugar de estudio

La zona del estudio está ubicada en la región de Puno, Provincia de Puno, distrito de Puno, específicamente en la Universidad Nacional del Altiplano; geográficamente está ubicada entre los  $15^{\circ} 48'$  y  $15^{\circ} 55'$  de latitud sur y los  $69^{\circ} 57'$  y  $70^{\circ} 03'$  de longitud oeste, comprende altitudes entre los 3,811 y 4,050 m.s.n.m., en la parte Sur del Perú, aproximadamente a 1,350 km. al Sur Este de Lima, en el flanco oriental de la Cordillera de los Andes y a una altitud de 3 812 m.s.n.m.

#### Figura 6

##### *Ubicación de Puno*



*Nota:* Ubicación de la ciudad de Puno, Adaptado de “Google Earth Pro”, por, Google Earth, 2023, <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>. Copyright 2023 Google. All rights reserved.

#### 3.2 Población

En la presente investigación, el tamaño de la población de estudio esta, conformadas por el gas producido por el biodigestor.



### **3.3 Muestra**

Para la presente investigación, la muestra esta, conformada por la cantidad de residuo solido orgánico. La composición específica de la biomasa se caracteriza por residuos de alimentos, cascaras y restos de frutas y verduras.

Tamaño de la muestra: 1,20 Kg.

### **3.4 Método de investigación**

#### **3.4.1 Tipo de investigación**

El tipo de investigación del proyecto denominado: Producción de Metano por Biodigestión de Residuos Sólidos Orgánicos en la Ciudad de Puno: Evaluación del Potencial Energético y la Eficiencia para Generar Energía Eléctrica, es del tipo no experimental, transversal, descriptivo; en ese sentido, la toma de datos es del tipo longitudinal, correlacional, causal, propuesto por. (Sampieri et al., 2010).

#### **3.4.2 El método propuesto**

La metodología de este estudio puede dividirse en dos etapas:

La recopilación de datos se centró en residuos biodegradables de cocina y domésticos. Estos datos se recogieron de la base de datos de la municipalidad, en conjunto representan datos de 4 mercados, a los que hay que añadir datos de otros sectores en Puno.

El montaje experimental incluye biodigestor con una capacidad de unos 30 litros. Para cargarlo de residuos biodegradables de cocina y domésticos hasta el 80% de su capacidad. Se tiene cuidado de garantizar la nula entrada de aire en el digestor para conseguir condiciones anaeróbicas. Tras el llenado, se cierran tanto la entrada como las salidas y la válvula de gas que se abre al depósito de gas se mantiene abierta. Durante los primeros veinte días del ciclo se produjo la expansión de del depósito de gas debido a la producción de gas. Estos veinte días constituyeron la fase transitoria de la generación de biogás y actuaron como un proceso discontinuo. Una vez finalizado el ciclo de veinte días, se extrajo el contenido del depósito de gas.

### **3.5 Descripción detallada del método por objetivos específicos**

De acuerdo a los objetivos específicos establecidos en la presente investigación denominada: Producción de Metano por Biodigestión de Residuos Sólidos Orgánicos en la Ciudad de Puno: Evaluación del Potencial Energético y la Eficiencia para Generar Energía Eléctrica.

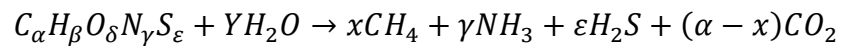
#### **3.5.1 Evaluación de la cantidad y características de los Residuos Sólidos Orgánicos**

El primer paso es la recogida de los residuos sólidos municipales. Existen diferentes métodos de recogida de residuos. Los residuos se recogen puerta a puerta en carros y carretillas, de cubos de basura, mediante el transporte de los residuos por los residentes a los vehículos de recogida de residuos. La recogida diaria de residuos es muy importante, ya que se trata principalmente de materia orgánica que empieza a descomponerse. La clasificación de los residuos por un individuo antes de enviarlos a los centros de recogida es un factor clave de la gestión de residuos. Así que cada residente debe clasificar los residuos orgánicos, inorgánicos, húmedos y secos. La gestión de residuos es un proceso cooperativo y la responsabilidad de todos para mantener su planeta verde y limpio. Los residuos recogidos se transportan a plantas donde se procesan en función de su calidad. de los residuos (Kaur et al., 2021).

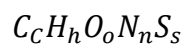
En el caso de los residuos sólidos urbanos, en primer lugar, hay que separar la materia orgánica de los residuos antes de ser tratados en un digestor anaeróbico. La mezcla se calienta tanque cerrado y el gas se captura mediante una cubierta flotante o se recoge en un tanque separado. Es esencial aplicar técnicas adecuadas de refinamiento al biogás producido durante la digestión anaerobia. Estos tratamientos se centran en la eliminación del dióxido de carbono y otros gases no deseados, garantizando que el biogás sea adecuado para aplicaciones energéticas. para. El proceso genera un residuo en forma de lodo oscuro y oloroso que debe eliminarse (Traven, 2023).

### A. Evaluación el potencial energético del metano producido y su viabilidad para la eficiente generación de energía eléctrica sostenible a nivel local

La producción estequiométrica de metano en la digestión anaeróbica puede calcularse mediante la ecuación de Buswell, como se muestra en la Ecuación (Bahrun et al., 2022).

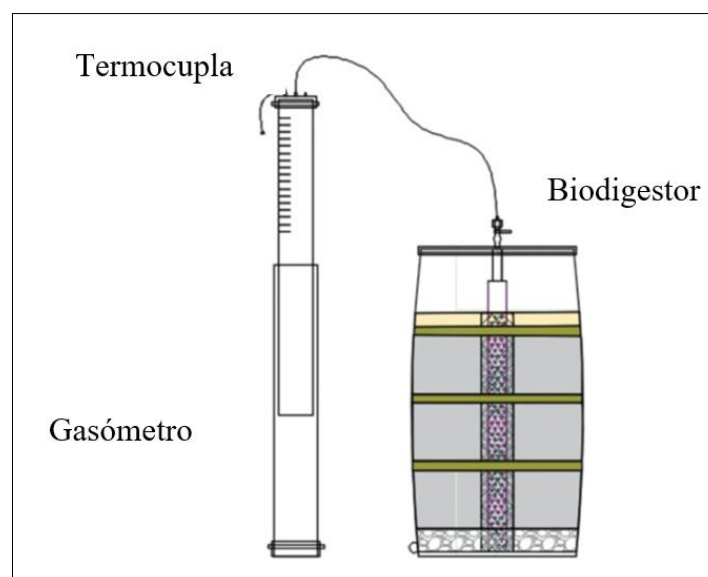


La tasa de producción de metano puede estimarse utilizando estas ecuaciones estequiométricas a partir de la descomposición de algún tipo de sustratos, en particular los materiales orgánicos de composición química (Bahrun et al., 2022).



#### Figura 7

Representación esquemática (gasómetro + biodigestor)

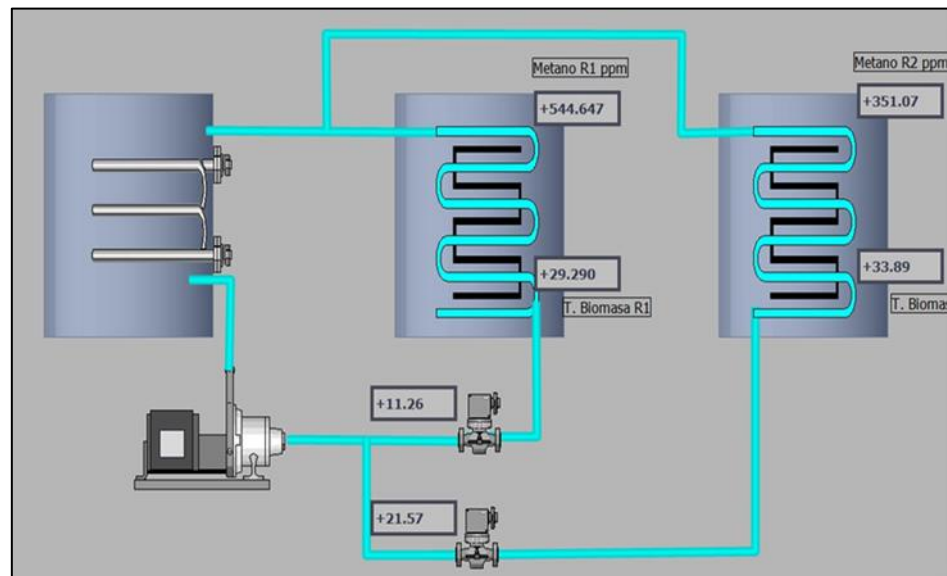


*Nota.* Tomado de “Study on preliminary economic availability of electric energy use from drying bed sludge by biogas from anaerobic digestion and incineration in Brazil”, por A. Silva, R. Barros, E. Lora, I. Silva dos Santos, E. Ribeiro, J. Rocha de Freitas y A. Crispim, 2023. *Cleaner Waste Systems* (2023), p.5, <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100117>. Copyright 2023 The Author(s).

Para la obtención del biogás, se sigue el diagrama de flujo de flujo, como se observa en la figura a continuación.

### Figura 8

*Diagrama de flujo de equipo biodigestor*



### 3.5.2 Cálculo del potencial energético del biogás

La metodología adoptada en este estudio para calcular el potencial energético utilizó un grado de eficiencia para la captación de gas, que viene determinado por el sistema biodigestor y también está relacionado con el poder calorífico inferior del biogás en las condiciones estándar de presión y temperatura. La potencia resultante es una función del valor calorífico del biogás quemado (Pinto et al., 2023):

$$P = Q_{CH_4} * E_c * LHV * \eta * \left( \frac{1}{31\ 536\ 000} * \frac{1}{1000} \right)$$

Donde:

P = Potencia (kW)

$Q_{CH_4}$  = Caudal de  $CH_4$  ( $m^3 \cdot a\tilde{no}^{-1}$ )

$E_c$  = Eficiencia de la captación de gas (%)

LHV = Valor calorífico inferior del biogás ( $kJ/m^3$ ), (tomado como  $35.800\ kJ \cdot m^{-3}$ )

$\eta$  = Eficiencia del motor de combustión interna funcionando a plena carga (tomado como 30%).

31 536 000 = tiempo de funcionamiento durante un año (s).

La energía producida a lo largo de un año es directamente proporcional a la potencia y el factor de capacidad de generación (FC) (Pinto et al., 2023).

La energía producida puede ser calculada a través de la ecuación siguiente:

$$E = P * CF * 8760$$

Donde:

E = Energía generada en un año (kWh)

P = Potencia (kW)

CF = Factor de capacidad de generación (adoptado 80%)

8760 = Tiempo de funcionamiento en un año (h).

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Resultados

De acuerdo a la metodología planteada para el presente estudio tenemos los resultados por cada objetivo específico.

##### 4.1.1 Evaluación de la cantidad y características de los RSO

En la tabla 2, se muestra la cantidad de los residuos aprovechables clasificados en residuos orgánicos que tiene un porcentaje de 17.5 % y residuos inorgánicos con un porcentaje de 20.6%.

**Tabla 2**

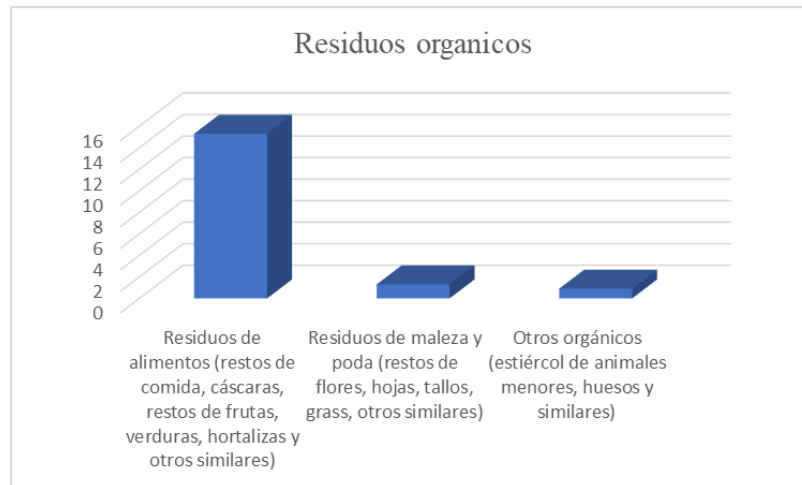
*Características de los residuos*

Tipo de residuo	Composición Porcentual (%)
<b>Residuos aprovechables</b>	
<b>Residuos Orgánicos</b>	
Residuos de alimentos (restos de comida, cáscaras, restos de frutas, verduras, hortalizas y otros similares)	15,3
Residuos de maleza y poda (restos de flores, hojas, tallos, grass, otros similares)	1,3
Otros orgánicos (estiércol de animales menores, huesos y similares)	0,9
<b>Residuos inorgánicos</b>	
Papel	3,0
Cartón	3,4
Vidrio	2,9
Plástico	3,7
Tecnopor	0,9
Tetra pack	0,5
Metales	2,7
Otros reaprovechables	3,5

Los residuos aprovechables se muestran en la gráfica siguiente.

**Figura 9**

*Características de los residuos*

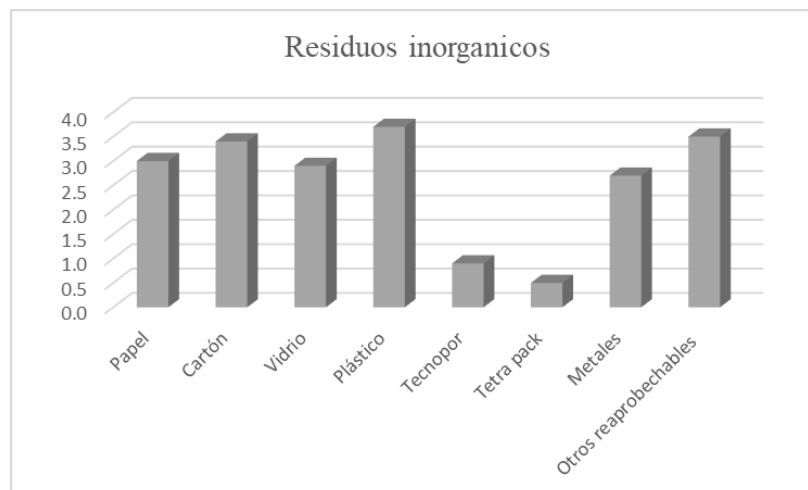


*Nota:* La figura 9, muestra la cantidad de los residuos aprovechables clasificados en residuos orgánicos como residuos de alimentos (restos de comida, cáscaras, restos de frutas, verduras, hortalizas y otros similares) que tiene un porcentaje de 15.3 %; residuos de maleza y poda (restos de flores, hojas, tallos, grass, otros similares) tiene un porcentaje de 1.3% y otros orgánicos (estiércol de animales menores, huesos y similares) con 0.9%.

Los residuos inorgánicos se muestran en la gráfica siguiente.

**Figura 10**

*Residuos inorgánicos*



*Nota:* La figura 10, muestra la cantidad de los residuos inorgánicos clasificados en papel (3%), cartón (3.4%), vidrio (2.9%), plástico (3.7%), Tecnopor (0.9%), Tetra pack (0.5%), metales (2.7%), y otros (3.5%).

En la tabla 3, se muestra la cantidad de los residuos no aprovechables para la producción de biogás.

**Tabla 3**

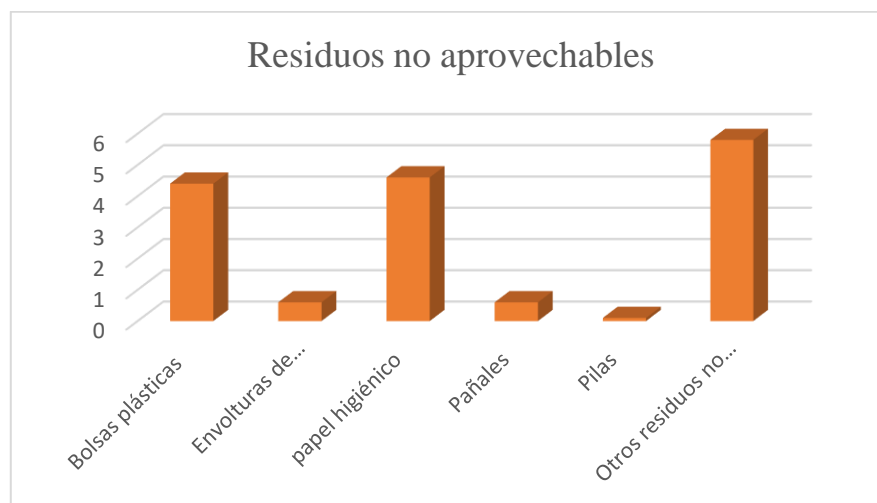
*Cantidad de residuos no aprovechables*

Tipo de residuo	Composición Porcentual (%)
<b>Residuos no reaprovechables</b>	
Bolsas plásticas	4,4
Envolturas de golosinas, plástico metalizado	0,6
papel higiénico	4,6
Pañales	0,6
Pilas	0,1
Otros residuos no categorizados	5,8

Los residuos no aprovechables se muestran en la gráfica siguiente.

**Figura 11**

*Residuos no aprovechables*



*Nota:* La figura 11, muestra la cantidad de los residuos no aprovechables clasificados en bolsas plásticas (4.4%), envolturas de golosinas (0.6%), papel higiénico (4.6%), pañales (0.6%), pilas (0.1%), y otros (5.8%).

En la tabla 4, se muestra la cantidad de toneladas de generación de residuos sólidos por día generados en diferentes sectores de la ciudad.



**Tabla 4**

*Generación de residuos sólidos*

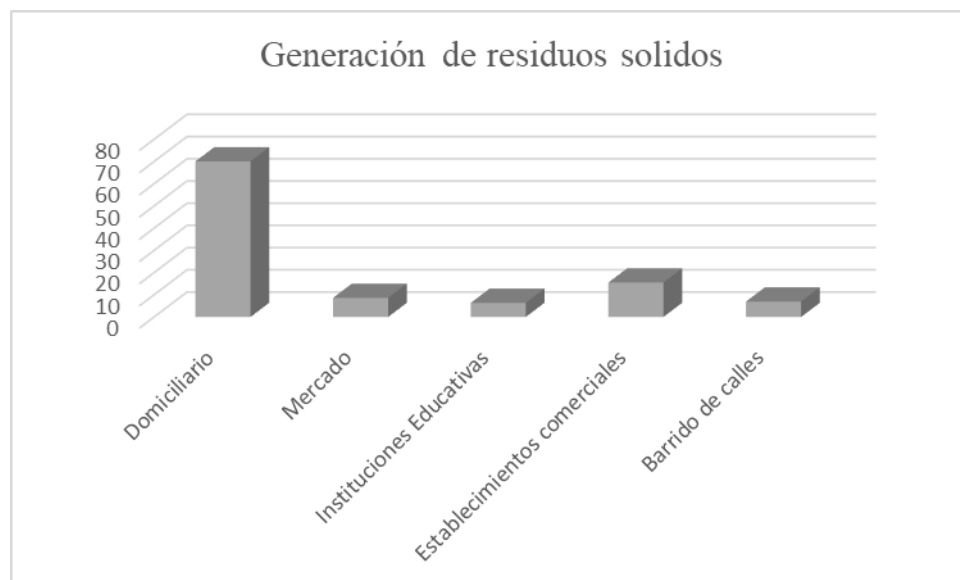
Generación de residuos solidos	Generación total (Tn/día)
Domiciliario	70,05
Mercado	8,61
Instituciones Educativas	6,33
Establecimientos comerciales	15,51
Barrido de calles	6,95
<b>Total</b>	<b>107.45</b>

*Nota:* En la tabla 4 podemos apreciar que en la generación de los residuos sólidos los residuos domiciliarios son los que más se generan en un día.

La generación de residuos sólidos por tipo de establecimiento se muestra en la gráfica siguiente.

**Figura 12**

*Generación de residuos sólidos*



*Nota:* La figura 12, muestra la cantidad de los residuos sólidos por tipo de establecimiento en toneladas al día, clasificados en domiciliario (70.5), mercados (8.61%), instituciones educativas (6.33), establecimientos comerciales (15.51) y barrido de calles (6.95).

En la tabla 5, se muestra la cantidad de generación de residuos sólidos urbanos por kilogramos generados en un día diferentes mercados de la ciudad.

**Tabla 5**

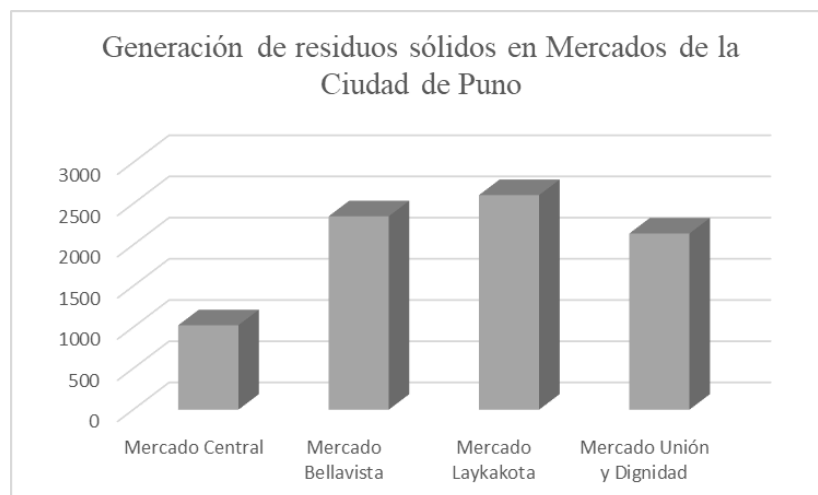
*Generación de RSU en mercados*

Mercados	Número de puestos	Generación total (Kg/día)	Generación total GT (Ton/día)
Mercado Central	475	1025.05	
Mercado Bellavista	731	2346.97	
Mercado Laykakota	811	2603.82	8.61
Mercado Unión y Dignidad	666	2138.28	

*Nota:* En la tabla 5 podemos apreciar que en la generación de los residuos sólidos urbanos es de 8.61 toneladas al día, el mercado Laykakota genera 2.6 toneladas al día siendo este el de mayor generación en un día.

**Figura 13**

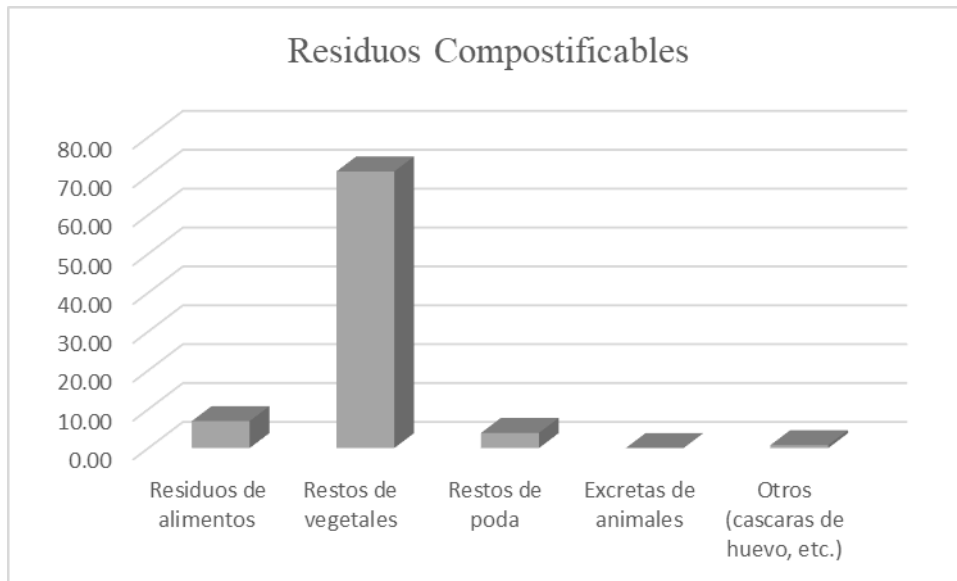
*Generación de Residuos en mercados*



*Nota:* La figura 13, muestra la cantidad de generación de residuos sólidos urbanos por kilogramos generados en un día en los diferentes mercados de la ciudad; clasificados en mercado Central (1025.05 Kg/día), mercado Bellavista (731 Kg/día), mercado Laykakota (811 Kg/día), y mercado Unión y Dignidad (666 Kg/día).

**Figura 14**

*Residuos compostificables*



*Nota:* La figura 14, muestra la cantidad de residuos sólidos urbanos compostificables generados y clasificados en residuos de alimentos (6.94%), restos de vegetales (71.17%), restos de poda (3.91%), y otros (0.76%).

Con estos datos calculamos la producción de metano por biodigestión en la ciudad de Puno.

Para calcular la biomasa total se considera la composición porcentual

$$(6,94 + 71,17 = 78,11\%)$$

Entonces la biomasa total es:

$$PT = 0.7811GT = 0,7811 \times 8610 = 6\,725,271 \text{ Kg}$$

$$PT = 6\,725,271 \text{ Kg}$$

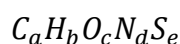
Tamaño de la muestra: 1,20 Kg.

Composición: Residuos de alimentos (restos de comida, cáscaras, restos de frutas, verduras)

**Tabla 6***Análisis de la muestra*

Análisis de la muestra realizado en laboratorio				
%C	%H	%O	%N	%S
43,88g	5,80g	40,39g	1,84g	0,31g

La fórmula empírica de la biomasa es:



Calculamos los valores siguientes:

$$a = 43,88 \text{ g} (1/12,0107 \text{ g/mol}) = 3,653 \text{ mol.}$$

$$b = 5,80 \text{ g} (1/1,0079 \text{ g/mol}) = 5,574 \text{ mol.}$$

$$c = 40,39 \text{ g} (1/15,999 \text{ g/mol}) = 2,524 \text{ mol.}$$

$$d = 1,84 \text{ g} (1/14,007 \text{ g/mol}) = 0,131 \text{ mol.}$$

$$e = 0,31 \text{ g} (1/32,010 \text{ g/mol}) = 9,684 \text{ mol.}$$

Tenemos la masa inicial (Mi)

$$\sum = 92.22 \text{ g.}$$

Dividiendo por la menor molaridad:

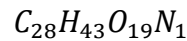
$$a = \frac{3,653}{0,131} = 27,885 \cong 28$$

$$b = \frac{5,574}{0,131} = 42,549 \cong 43$$

$$c = \frac{2,524}{0,131} = 19,267 \cong 19$$

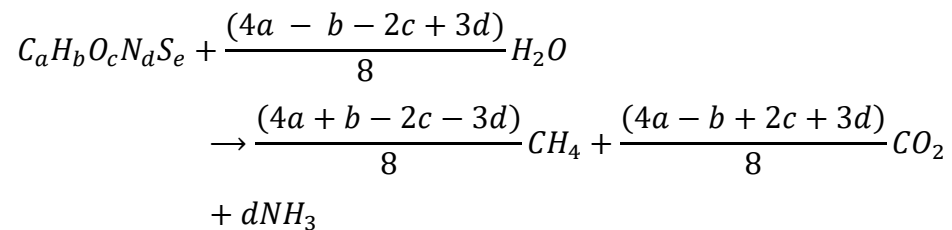
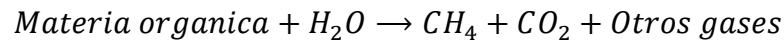
$$d = \frac{0,131}{0,131} = 1,0 \cong 1$$

Reemplazando en la fórmula tenemos:



Que vendría a ser la fórmula empírica de la Biomasa

La transformación de la materia orgánica por degradación anaeróbica.



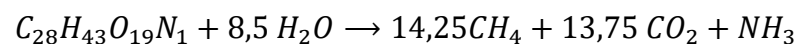
Reemplazando en los coeficientes de la reacción se tiene:

$$\frac{(4a - b - 2c + 3d)}{4} = 8,5$$

$$\frac{(4a + b - 2c - 3d)}{8} = 14,25$$

$$\frac{(4a - b + 2c + 3d)}{8} = 13,75$$

Reemplazando estos datos en la reacción se obtiene:



$$697 + 153,125 \rightarrow 228 + 605,119 + 17,0307$$

$$850,7528 \frac{g}{mol} = 850,7497 \frac{g}{mol}$$

*Entrada                  Salida*

Máximo volumen teórico del gas generado.

$$Vol CH_4 = \frac{(228 * 92,22)}{697 * 717} g/m^3$$

$$Vol CH_4 = 0,040734 g/m^3$$

Peso del metano.

$$\text{Peso } CH_4 = \frac{(228)}{697} * 1140 \text{ g.}$$

$$\text{Peso } CH_4 = 0,3729 \text{ kg.}$$

Nota: El Peso de la muestra es

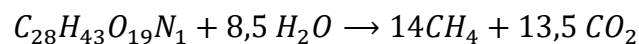
$$1200\text{g} * 0,95 = 1140\text{g.}$$

Rendimiento de producción de metano ( $Y_{P/S}$ ).

P: Producto

S: Sustrato

Predicción del Rendimiento Teórico:



$$697 \text{ g/mol} \rightarrow 224 \text{ g/mol}$$

$$100\text{g} * \frac{\left(224 \frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)}{\left(697 \frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} = 32,1377\text{g}CH_4$$

$$(Y_{P/S}) = \frac{(Pf - Po)}{(So - Sf)} = \left\{ \frac{(546,236 - 217,8)\text{mg/L}}{(23,8578 - 21,40)\text{g}} \right\}$$

$$(Y_{P/S}) = 0,328436(\text{g/L})/2,4578\text{g}$$

$$(Y_{P/S}) = 0,1336$$

Cálculo del rendimiento o eficiencia.

$$e = \left\{ \frac{(Y_{P/S})_{EXP}}{(Y_{P/S})_{TEORICO}} \right\} * 100 = \left( \frac{0,1336}{0,321378} \right) * 100$$

$$e = 41,5709 \%$$

Cálculo del volumen de metano que se puede producir:

$$Vol.Total CH_4 = (Peso\ específico) * PT = \left(\frac{Vol. CH_4}{Peso CH_4}\right) * PT$$

$$Vol.Total CH_4 = \left(\frac{0,040734m^3}{0,3729}\right) * 6725,271\ kg$$

$$Vol.Total CH_4 = 0,10924\ m^3/kg * 6725,271\ kg$$

$$Vol.Total CH_4 = 734,6686\ m^3$$

#### 4.1.2 Evaluación del potencial energético

De acuerdo a la metodología planteada tenemos lo siguiente:

La potencia resultante es:

$$P = Q_{CH_4} * E_c * LHV * \eta * \left(\frac{1}{31536000} * \frac{1}{1000}\right)$$

Donde:

P = Potencia (kW)

$Q_{CH_4}$  = Caudal de CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>) = 268142, 943

$E_c$  = Eficiencia de la captación de gas (%) = 41, 5709 %

LHV = Valor calorífico inferior del biogás (kJ/m<sup>3</sup>), (tomado como 35 800 kJ.m<sup>-3</sup>)

$\eta$  = Eficiencia del motor de combustión interna funcionando a plena carga (tomado como 30%).

31 536 000 = tiempo de funcionamiento durante un año (s).

Reemplazando datos:

$$P = 268142,943 * 41,5709\% * 35800 * 30 * \left(\frac{1}{31536000} * \frac{1}{1000}\right)$$

$$P = 379,62384\ KW$$

La energía producida a lo largo de un año es directamente proporcional a la Potencia y el factor de capacidad de generación (FC).

$$E = P * CF * 8760$$

Donde:

E = Energía generada en un año (kWh)

P = Potencia (kW)

CF = Factor de capacidad de generación (adoptado 80%)

8760 = Tiempo de funcionamiento en un año (h).

$$E = 379,62384 * 0,8 * 8760$$

$$E = 2\ 660\ 403,871\ \text{kWh}$$

Considerando 1KWh = 3600 kilo Julios = 3600 kJ

$$\Rightarrow E = 2\ 660\ 403,871 * 3\ 600$$

$$\Rightarrow E = 9\ 577\ 453\ 935\ \text{kJ}$$

Para seleccionar un MCI se calcula la potencia si se utiliza en un día.

$$Pe = 2\ 660\ 403,871\ \text{kWh} / 8\ 760\ \text{h}$$

$$Pe = 303,7\ \text{kW}$$

Para la selección de un MCI se considera una potencia de selección igual a 300 kW.

#### 4.1.3 Contrastación de hipótesis

De acuerdo a la formulación de las hipótesis específicas tenemos el siguiente desarrollo

##### A. Análisis inferencial

Relación entre la biodigestión de los residuos sólidos urbanos orgánicos recolectados en la ciudad de Puno que representan cantidades



significativas para la producción de metano, que se traduce en potencial energético.

## B. Hipótesis específica 1

La cantidad de los residuos sólidos orgánicos recolectados en la ciudad de Puno tendrán las características adecuadas para ser transformados en metano a través del proceso de biodigestión.

- **H<sub>1</sub>**: La cantidad de los residuos sólidos orgánicos recolectados en la Ciudad de Puno tendrán las características adecuadas para ser transformados en metano a través del proceso de biodigestión.
- **H<sub>0</sub>**: La cantidad de los residuos sólidos orgánicos recolectados en la Ciudad de Puno no tendrán las características adecuadas para ser transformados en metano a través del proceso de biodigestión.

- **Nivel de significancia**

$\alpha = 0,05$  o 5%. Es la probabilidad de cometer un error

- **Nivel de confianza**

$1 - \alpha = 0,95$  o 95%. Probabilidad de que la estimación de un parámetro en una muestra sea el valor real en la población.

- **Estadístico de prueba**

Coefficiente de correlación de Pearson

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

n : número de pares de muestra

$x_i$  : valor de variable de residuos sólidos orgánicos

$y_i$  : valor de variable de producción de metano

- **Regla de decisión**

Si:  $p \text{ valor} \leq 0,05$  se **rechaza** la hipótesis nula.

Si:  $p$  valor  $> 0,05$  se **acepta** la hipótesis nula

- **Calculo de la prueba**

Con el software estadístico InfoStat/L versión 2016, tenemos el siguiente resultado:

- **Coefficiente de correlación**

Se tiene el siguiente resultado

Correlación de Pearson

**Tabla 7**

*p* valor hipótesis 1

Correlación de Pearson				
Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
RSU	RSU	7	1.0000	<0.0001
RSU	METANO	7	0.9707	0.0006
RSU	RSU	7	0.9707	0.0006
METANO	RSU	7	1.0000	<0.0001

- **Decisión**

Como el  $p$  valor: es 0,0006 y este valor es menor que 0,05 entonces se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

- **Conclusión**

Se acepta la hipótesis alterna, es decir la cantidad de los residuos sólidos orgánicos recolectados en la ciudad de Puno tienen las características adecuadas para ser transformados en metano a través del proceso de biodigestión

### C. Hipótesis específica 2

El potencial energético del metano a producir está relacionado con la capacidad eficiente de generar energía eléctrica sostenible a nivel local.

- **H1:** El potencial energético del metano a producir está relacionado con la capacidad eficiente de generar energía eléctrica sostenible a nivel local.
- **H0:** El potencial energético del metano a producir **no** está relacionado con la capacidad eficiente de generar energía eléctrica sostenible a nivel local.
- **Nivel de significancia**  
 $\alpha = 0,05$  o 5%. Es la probabilidad de cometer un error
- **Nivel de confianza**  
 $1 - \alpha = 0,95$  o 95%. Probabilidad de que la estimación de un parámetro en una muestra sea el valor real en la población.
- **Estadístico de prueba**  
De acuerdo al procedimiento anterior con la correlación de Pearson.
- **Regla de decisión**  
Si:  $p \text{ valor} \leq 0,05$  se rechaza la hipótesis nula.  
Si:  $p \text{ valor} > 0,05$  se acepta la hipótesis nula
- **Calculo de la prueba**  
Para diferentes eficiencias tenemos los resultados de la producción de energía que se muestra en la tabla 8.

**Tabla 8**

*Eficiencia vs Potencia generada*

$\eta$ (%)	kW
26	329.01
27	341.66
28	354.32
29	366.97
30	379.62
31	392.28

32	404.93
33	417.59
34	430.24
35	442.89

Con el software estadístico InfoStat/L versión 2016, tenemos el siguiente resultado:

- **Coefficiente de correlación**

Se tiene el siguiente resultado

**Tabla 9**

*p valor hipótesis 2*

Correlación de Pearson				
Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
Eficiencia	Eficiencia	10	1.00	<0.0001
Eficiencia	Potencia	10	1.00	<0.0001
Potencia	Eficiencia	10	1.00	<0.0001
Potencia	Potencia	10	1.00	<0.0001

- **Decisión**

Como el p valor: es 0,0001 y este valor es menor que 0,05 entonces se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

- **Conclusión**

Se acepta la hipótesis alterna; es decir, el potencial energético del metano a producir está relacionado con la capacidad eficiente de generar energía eléctrica sostenible a nivel local.

## 4.2 Discusión

Como resultado de acuerdo al primer objetivo planteado se tiene que metano generado que es 734,6382 metros cúbicos, el potencial energético que se puede producir se calculó en 5142,6802 Kwh. (18513.65 Mega julios), este alto potencial energético destaca la importancia de utilizar residuos de alimentos para la producción de energía a través de la biodigestión. Otro autor menciona:

El sistema de biogásificación en condiciones de alimentación por lotes de la granja Yuge de Kobe (Japón) es un excelente ejemplo de gestión adecuada de residuos agrícolas para el aprovechamiento de los recursos. En la actualidad, los dos digestores de la granja suministran 2.400 m<sup>3</sup> de biogás procedente de estiércol de vaca lechera, subproductos lácteos y otros residuos. Sin embargo, las enmiendas a los sustratos pueden aumentar la producción de biogás a 13 166,01 m<sup>3</sup> anuales con un potencial de energía eléctrica de 2 843,20 kWh/año, frente a la producción actual de 518,28 kWh/año, desplazando así a la electricidad generada a partir de combustibles fósiles (Richards y Yabar, 2023).

Para el segundo objetivo tenemos que la viabilidad para la eficiente generación de energía eléctrica se evidenció con una potencia eléctrica calculada de 303,7 KW. Estos resultados sugieren que la conversión de metano en electricidad es un enfoque prometedor y factible desde el punto de vista energético. En ese contexto otro autor indica:

La generación de energía eléctrica a partir de biogás mediante un proceso de codigestión de bovino y porcino en biodigestores anaeróbicos. Los resultados mostraron que los proyectos de plantas de biogás a partir de 1.410 cabezas de ganado vacuno y 2.350 cabezas de ganado porcino. Esta proporción de residuos da lugar a un flujo de metano de 163,41 m<sup>3</sup>/día, lo que corresponde a un potencial energético de 128 MWh/año, lo que sitúa a la empresa dentro de la categorización de micro generación distribuida (Vilas Bôas et al., 2023).

Que la digestión anaerobia podría ser una metodología prometedora para convertir los bioresiduos en combustible sostenible para aplicaciones como generación de energía, calefacción, secado, refrigeración, etc. La enérgica modificación de las tecnologías las políticas gubernamentales, el comportamiento social y las aspiraciones económicas obligan a analizar estos factores para generar energía a partir de bioresiduos, examina conjuntamente los distintos métodos de pretratamiento y codigestión que mejoran la eficacia de la digestión anaeróbica; además, se resumen y comparan las ventajas económicas de estas tecnologías bien estudiadas en términos de rendimiento del biodigestor, ventajas medioambientales y estado de las aplicaciones en el mundo real (Glivin et al., 2021).

## CONCLUSIONES

**Del objetivo principal:** El metano producido por biodigestión de residuos sólidos orgánicos, caracterizados principalmente por residuos de alimentos, cascaras y restos de verduras, en la ciudad de Puno, con un rendimiento del proceso de biodigestión de 41,5709 %, fue un volumen de **734,6382** metros cúbicos.

**De los objetivos específicos:**

1. Con el metano generado que es 734,6382 metros cúbicos, el potencial energético que se puede producir se calculó en 5142,6802 Kwh. (18513.65 Mega julios), este alto potencial energético destaca la importancia de utilizar residuos de alimentos para la producción de energía a través de la biodigestión.
2. La viabilidad para la eficiente generación de energía eléctrica se evidenció con una potencia eléctrica calculada de 303,7 KW .Estos resultados sugieren que la conversión de metano en electricidad es un enfoque prometedor y factible desde el punto de vista energético.



## RECOMENDACIONES

- Para optimizar la eficiencia, se recomienda un análisis detallado de las características específicas de los residuos y del proceso de biodigestión.
- Se podría explorar la posibilidad de mejorar la eficiencia del sistema de generación de energía eléctrica para maximizar el rendimiento.
- En resumen, los resultados sugieren que la biodigestión de residuos sólidos orgánicos en la ciudad de Puno tiene un potencial significativo para la generación de metano con un alto valor energético, demostrando viabilidad para la producción eficiente de energía eléctrica

## BIBLIOGRAFÍA

- Adetunji, A. I., Oberholster, P. J., y Erasmus, M. (2023). From garbage to treasure: A review on biorefinery of organic solid wastes into valuable biobased products. *Bioresource Technology Reports*, 24(August), 101610. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101610>
- Agonafer, T. D., Eremed, W. B., y Adem, K. D. (2022). Biogas-based trigeneration system: A review. *Results in Engineering*, 15(July), 100509. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100509>
- Ajay, C. M., Mohan, S., y Dinesha, P. (2021). Decentralized energy from portable biogas digesters using domestic kitchen waste: A review. *Waste Management*, 125, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.031>
- Almatrafi, E., Khaliq, A., y Abuhabaya, A. (2022). Thermodynamic and exergetic assessment of a biomass derived syngas fueled gas turbine powered trigeneration system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 35(March), 102099. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102099>
- Avaci, A. B., Melegari De Souza, S. N., Werncke, I., y Chaves, L. I. (2013). Financial economic scenario for the microgeneration of electric energy from swine culture-originated biogas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 272–276. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.005>
- Bagdadee, A. H., Maitraya, A. M., Islam, A., y Siddique, M. N. E. A. (2023). A review on hybrid energy generation: Cow dung biogas, solar thermal and kinetic energy integration for power production. *Energy and Built Environment*, September. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.09.004>
- Bahrún, M. H. V., Bono, A., Othman, N., y Zaini, M. A. A. (2022). Carbon dioxide removal from biogas through pressure swing adsorption – A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 183, 285–306. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.05.012>
- Caetano, B. C., Santos, N. D. S. A., Hanriot, V. M., Sandoval, O. R., y Huebner, R. (2022). Energy conversion of biogas from livestock manure to electricity energy using a Stirling engine. *Energy Conversion and Management: X*, 15(April).



<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100224>

- Cattaneo, C. R., Muñoz, R., Korshin, G. V., Naddeo, V., Belgiorno, V., y Zarra, T. (2023). Biological desulfurization of biogas: A comprehensive review on sulfide microbial metabolism and treatment biotechnologies. *Science of the Total Environment*, 893(June). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164689>
- Cherry, C. A., Rios, M., McCord, A., Stefanos, S., y Venkataramanan, G. (2014). Portable electrification using biogas systems. *Procedia Engineering*, 78, 317–326. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.07.073>
- Chripim, M. C., Scholz, M., y Nolasco, M. A. (2021). Biogas recovery for sustainable cities: A critical review of enhancement techniques and key local conditions for implementation. *Sustainable Cities and Society*, 72(May), 103033. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103033>
- Elizalde-Blancas, F., Celik, I. B., Rangel-Hernandez, V., Hernandez-Guerrero, A., y Riesco-Avila, J. M. (2013). Numerical modeling of SOFCs operating on biogas from biodigesters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(1), 377–384. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.151>
- Emmanuel, J. K., Nganyira, P. D., y Shao, G. N. (2022). Evaluating the potential applications of brewers' spent grain in biogas generation, food and biotechnology industry: A review. *Heliyon*, 8(10), e11140. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11140>
- Ferraresi de Araujo, G. J., y Walter Borges de Oliveira, S. V. (2023). Economic, energetic and environmental analysis of the utilization of swine manure in Brazil: Opportunities and challenges. *Energy Strategy Reviews*, 47(February), 101089. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101089>
- Ferreira, L. R. A., Otto, R. B., Silva, F. P., De Souza, S. N. M., De Souza, S. S., y Ando Junior, O. H. (2018). Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94(June), 440–455. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.034>
- Freitas, F. F., De Souza, S. S., Ferreira, L. R. A., Otto, R. B., Alessio, F. J., De Souza, S. N. M., Venturini, O. J., y Ando Junior, O. H. (2019). The Brazilian market of

- distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101(June 2018), 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.007>
- Glivin, G., Kalaiselvan, N., Mariappan, V., Premalatha, M., Murugan, P. C., y Sekhar, J. (2021). Conversion of biowaste to biogas: A review of current status on techno-economic challenges, policies, technologies and mitigation to environmental impacts. *Fuel*, 302(May), 121153. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121153>
- Hasan, M. M., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., Ashwath, N., y Jahirul, M. I. (2021). Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145(March), 111073. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111073>
- Kaur, A., Bharti, R., y Sharma, R. (2021). Municipal solid waste as a source of energy. *Materials Today: Proceedings*, 81(2), 904–915. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.286>
- Kumar, A., y Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, 69, 407–422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- Lino, F. A. M., Ismail, K. A. R., y Castañeda-Ayarza, J. A. (2023). Municipal solid waste treatment in Brazil: A comprehensive review. *Energy Nexus*, 11(August). <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100232>
- Marcos, A., Al-Kassir, A., López, F., Cuadros, F., y Brito, P. (2012). Environmental treatment of slaughterhouse wastes in a continuously stirred anaerobic reactor: Effect of flow rate variation on biogas production. *Fuel Processing Technology*, 103, 178–182. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.12.035>
- Maturo, A., Petrucci, A., Forzano, C., Giuzio, G. F., Buonomano, A., y Athienitis, A. (2021). Design and environmental sustainability assessment of energy-independent communities: The case study of a livestock farm in the North of Italy. *Energy Reports*, 7, 8091–8107. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.05.080>
- Mulu, E., M'Arimi, M. M., y Ramkat, R. C. (2021). A review of recent developments in application of low cost natural materials in purification and upgrade of biogas.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145(March), 111081.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111081>
- Nogueira, C. E. C., De Souza, S. N. M., Micuanski, V. C., y Azevedo, R. L. (2015). Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 300–305.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.023>
- Oliveira, A. C. L. de, Renato, N. dos S., Martins, M. A., Mendonça, I. M. de, Moraes, C. A., y Resende, M. de O. (2021). Modeling for estimating and optimizing the energy potential of animal manure and sewage in small and medium-sized farms. *Journal of Cleaner Production*, 319(August). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128562>
- Pinto, J. A., Barros, R. M., dos Santos, I. F. S., Filho, G. L. T., de Oliveira Botan, M. C., Bôas, T. F. V., y de Cássia Crispim, A. M. (2023). Study of the anaerobic co-digestion of bovine and swine manure: Technical and economic feasibility analysis. *Cleaner Waste Systems*, 5(May), 100097.  
<https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100097>
- Richards, D., y Yabar, H. (2023). Promoting energy and resource recovery from livestock waste: Case study Yuge Farm, Japan. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7(November 2022), 100299.  
<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100299>
- Roositalab, A., Hamidavi, F., y Kargari, A. (2023). A review of membrane material for biogas and natural gas upgrading. *Gas Science and Engineering*, 114(April), 204969. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2023.204969>
- Rupf, G. V., Bahri, P. A., De Boer, K., y McHenry, M. P. (2016). Broadening the potential of biogas in Sub-Saharan Africa: An assessment of feasible technologies and feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 556–571.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.023>
- Saadoun, L., Campitelli, A., Kannengiesser, J., Stanojkovski, D., El Alaoui El Fels, A., Mandi, L., y Ouazzani, N. (2022). Acidogenic digestion of organic municipal solid waste in a pilot scale reactor: Effect of waste ratio and leachate recirculation and dilution on hydrolysis and medium chain fatty acid production. *Bioresource*

- Technology Reports*, 17(November 2021), 100872.  
<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100872>
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., y Baptista, L. M. del P. (2010). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN* (S. A. D. C. . McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES (ed.); Quinta edi). McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Sganzerla, W. G., Buller, L. S., Mussatto, S. I., y Forster-Carneiro, T. (2021). Techno-economic assessment of bioenergy and fertilizer production by anaerobic digestion of brewer's spent grains in a biorefinery concept. *Journal of Cleaner Production*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126600>
- Shah, A. V., Srivastava, V. K., Mohanty, S. S., y Varjani, S. (2021). Municipal solid waste as a sustainable resource for energy production: State-of-the-art review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105717. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105717>
- Silva, A. P. M., Barros, R. M., Lora, E. E. S., Silva dos Santos, I. F., Ribeiro, E. M., de Freitas, J. V. R., y de Cassia Crispim, A. M. (2023). Study on preliminary economic availability of electric energy use from drying bed sludge by biogas from anaerobic digestion and incineration in Brazil. *Cleaner Waste Systems*, 6(August), 100117. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100117>
- Souza, S. N. M. D., Werncke, I., Marques, C. A., Bariccatti, R. A., Santos, R. F., Nogueira, C. E. C., y Bassegio, D. (2013). Electric energy micro-production in a rural property using biogas as primary source. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 385–391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.035>
- Tápparo, D. C., Cândido, D., Steinmetz, R. L. R., Etzkorn, C., do Amaral, A. C., Antes, F. G., y Kunz, A. (2021). Swine manure biogas production improvement using pre-treatment strategies: Lab-scale studies and full-scale application. *Bioresource Technology Reports*, 15(May), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100716>
- Traven, L. (2023). Sustainable energy generation from municipal solid waste: A brief overview of existing technologies. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8(September), 100491. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100491>

- Varghese, S., Demeke, M. M., Verhé, R., Redant, E., Cruyssen, C. Vander, y Thevelein, J. M. (2023). Process optimization for saccharification and fermentation of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW) to maximize ethanol production performance. *Bioresource Technology Reports*, 24(June). <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101681>
- Vilas Bôas, T. F., Barros, R. M., Pinto, J. A., dos Santos, I. F. S., Lora, E. E. S., Andrade, R. V., Tiago Filho, G. L., Almeida, K. A., y Machado, G. de O. (2023). Energy potential from the generation of biogas from anaerobic digestion of olive oil extraction wastes in Brazil. *Cleaner Waste Systems*, 4(February), 100083. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100083>
- Villarroel-Schneider, J., Höglund-Isaksson, L., Mainali, B., Martí-Herrero, J., Cardozo, E., Malmquist, A., y Martin, A. (2022a). Energy self-sufficiency and greenhouse gas emission reductions in Latin American dairy farms through massive implementation of biogas-based solutions. *Energy Conversion and Management*, 261(November 2021). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115670>
- Villarroel-Schneider, J., Höglund-Isaksson, L., Mainali, B., Martí-Herrero, J., Cardozo, E., Malmquist, A., y Martin, A. (2022b). Energy self-sufficiency and greenhouse gas emission reductions in Latin American dairy farms through massive implementation of biogas-based solutions. *Energy Conversion and Management*, 261(April). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115670>
- Villarroel-Schneider, J., Mainali, B., Martí-Herrero, J., Malmquist, A., Martin, A., y Alejo, L. (2020). Biogas based polygeneration plant options utilizing dairy farms waste: A Bolivian case. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37(November 2019), 100571. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100571>
- Walter Borges de Oliveira, S. V., Leoneti, A. B., Magrini Caldo, G. M., y Borges de Oliveira, M. M. (2011). Generation of bioenergy and biofertilizer on a sustainable rural property. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2608–2618. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.048>
- Wang, S., Wen, Y., Shi, Z., Nuran Zaini, I., Göran Jönsson, P., y Yang, W. (2022). Novel carbon-negative methane production via integrating anaerobic digestion and pyrolysis of organic fraction of municipal solid waste. *Energy Conversion and*



- Management*, 252(November 2021).  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115042>
- Wresta, A., Andriani, D., Saepudin, A., y Sudibyo, H. (2015). Economic analysis of cow manure biogas as energy source for electricity power generation in small scale ranch. *Energy Procedia*, 68, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.240>
- Yang, Y., Wang, S., Wang, S., Wang, Q., Xie, W., Ye, L., Tu, J., Zhang, X., Li, G., y Xiang, N. (2022). Lightning trip-out risk assessment and differential lightning protection of 35 kV transmission lines in mountain wind farm. *Energy Reports*, 8, 581–588. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.171>



ANEXO

Anexo 1: Matriz de consistencia

Pregunta general	Hipótesis general	Objetivo general	Variables	Métodos	Prueba estadística
¿Cuál será la relación entre la producción de metano por biodigestión de Residuos Sólidos Orgánicos, su potencial energético y la eficiencia en la generación de energía eléctrica en la Ciudad de Puno?	La biodigestión de los Residuos Sólidos Urbanos orgánicos recolectados en la Ciudad de Puno representan cantidades significativas para la producción de metano, lo cual se pueda traducir en un potencial energético viable para generar energía eléctrica, en forma eficiente.	Evaluar la relación entre la producción de metano por biodigestión de Residuos Sólidos Orgánicos, su potencial energético y la eficiencia en la generación de energía eléctrica en la Ciudad de Puno.		evaluar la viabilidad técnica energética de los residuos orgánicos en Puno mediante la biodigestión para obtener metano y generar energía eléctrica.	
<b>Preguntas específicas</b>	<b>Hipótesis específicas</b>	<b>Objetivos específicos</b>			
¿Cuál será las características y cantidad de residuos sólidos orgánicos recolectados en diferentes zonas de la Ciudad de Puno, cómo influirán en la producción de metano a través del proceso de biodigestión?	La cantidad de los RSU orgánicos recolectados en diferentes zonas de la Ciudad de Puno tendrán las características adecuadas para ser transformados en metano a través del proceso de biodigestión.	<b>Objetivos Especifico 1</b>  <b>Variable Independiente:</b> residuos sólidos orgánicos <b>Variable dependiente:</b> producción de metano		La población de estudio incluye todos los residuos orgánicos generados en la Ciudad de Puno, tanto a nivel doméstico como industrial/comercial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de Correlación</li> </ul>
¿Cuál será el potencial energético del metano a producir y cómo se relacionará con la eficiencia en la generación de energía eléctrica sostenible a nivel local?	El potencial energético del metano a producir está relacionado con la capacidad eficiente de generar energía eléctrica sostenible a nivel local	<b>Objetivos Especifico 2</b>  <b>Variable Independiente:</b> Metano producido <b>Variable dependiente:</b> Generación de energía eléctrica.		se utiliza un enfoque de muestreo estratificado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de Regresión Lineal</li> </ul>

## Anexo 2. Datos de campo

DIA 1 - 20/04/2023			
HORA	REACTOR 1		REACTOR 2
	TIEMPO	CONCENTRACION	CONCENTRACION
1	08:30	361,950	217,824
2	09:00	361,980	217,952
3	09:30	362,326	218,750
4	10:00	362,856	218,850
5	10:30	363,021	219,010
6	11:00	363,523	219,210
7	11:30	363,686	218,230
8	12:00	364,845	218,331
9	12:30	364,676	223,121
10	13:00	365,152	223,221
11	13:30	365,210	225,642
12	14:00	365,235	225,742
13	14:30	365,412	225,842
14	15:00	366,521	225,841
15	15:30	367,420	234,214
16	16:00	367,420	234,313
17	16:30	368,750	234,741
18	17:00	369,850	234,641
19	17:30	370,080	233,424
20	18:00	371,280	233,524
21	18:30	371,410	238,754
22	19:00	371,510	239,754
23	19:30	372,740	239,421
24	20:00	372,840	241,421
25	20:30	374,170	242,524
26	21:00	374,370	243,524
27	21:30	375,450	245,541
28	22:00	375,650	246,541
29	22:30	375,730	244,684
30	23:00	375,830	245,654
31	23:30	376,060	245,211
32	00:00	377,080	246,211
33	00:30	378,390	253,428
34	01:00	379,490	249,228
35	01:30	380,720	255,647
36	02:00	379,720	256,647
37	02:30	377,050	258,424
38	03:00	378,150	258,524
39	03:30	380,380	257,641
40	04:00	381,480	257,741
41	04:30	378,710	262,254
42	05:00	379,810	262,354
43	05:30	379,040	263,421
44	06:00	380,140	263,521
45	06:30	380,370	264,524
46	07:00	380,470	264,624
47	07:30	383,520	264,520
48	08:00	383,720	264,630

DIA 2 - 21/04/2023			
HORA	REACTOR 1		REACTOR 2
	TIEMPO	CONCENTRACION	CONCENTRACION
1	08:30	384,542	264,895
2	09:00	384,642	264,898
3	09:30	384,235	264,981
4	10:00	384,325	264,988
5	10:30	385,125	265,265
6	11:00	385,225	265,267
7	11:30	384,314	265,985
8	12:00	384,324	265,989
9	12:30	386,557	266,425
10	13:00	386,967	266,428
11	13:30	390,534	266,671
12	14:00	390,737	266,677
13	14:30	388,457	271,523
14	15:00	389,557	271,528
15	15:30	390,757	271,524
16	16:00	390,483	271,529
17	16:30	391,483	272,365
18	17:00	392,657	272,368
19	17:30	394,524	270,254
20	18:00	395,424	270,259
21	18:30	393,634	273,365
22	19:00	393,834	273,367
23	19:30	393,562	276,321
24	20:00	393,752	276,324
25	20:30	395,421	277,584
26	21:00	395,441	277,586
27	21:30	396,537	278,362
28	22:00	396,577	278,365
29	22:30	394,531	279,235
30	23:00	394,621	279,236
31	23:30	394,634	278,235
32	00:00	394,732	278,239
33	00:30	394,532	280,235
34	01:00	394,633	280,240
35	01:30	395,531	280,967
36	02:00	395,537	280,972
37	02:30	395,868	282,365
38	03:00	395,864	282,378
39	03:30	398,425	282,365
40	04:00	398,524	282,369
41	04:30	398,867	283,624
42	05:00	398,868	283,648
43	05:30	404,483	284,652
44	06:00	404,493	284,656
45	06:30	405,235	284,523
46	07:00	405,335	284,536
47	07:30	405,435	284,539
48	08:00	406,483	284,356



HORA	DIA 3 - 22/04/2023		
	TIEMPO	REACTOR 1	REACTOR 2
		CONCENTRACION	CONCENTRACION
1	08:30	407,236	285,365
2	09:00	407,236	286,523
3	10:00	408,362	289,532
4	11:00	409,125	290,321
5	12:00	409,365	294,362
6	13:00	409,235	293,251
7	14:00	410,236	296,321
8	15:00	415,532	296,236
9	16:00	421,214	297,362
10	17:00	420,125	298,325
11	18:00	421,362	298,352
12	19:00	424,235	299,231
13	20:00	425,635	300,215
14	21:00	425,635	300,100
15	22:00	425,635	299,321
16	23:00	425,236	298,235
17	00:00	424,236	300,265
18	01:00	426,235	312,231
19	02:00	426,321	314,236
20	03:00	426,235	315,236
21	04:00	426,421	318,256
22	05:00	427,235	320,145
23	06:00	427,325	322,362
24	07:00	427,236	325,124
25	08:00	432,265	327,261
26	09:00	438,523	329,421
27	10:00	439,321	330,121
28	11:00	439,523	331,521
29	12:00	438,362	333,215
30	13:00	440,526	334,542
31	14:00	441,325	335,326
32	15:00	442,362	336,523
33	16:00	442,213	337,236
34	17:00	442,362	339,421
35	18:00	443,321	340,236
36	19:00	441,236	342,521
37	20:00	441,321	346,201
38	21:00	442,362	347,235
39	22:00	442,362	348,263
40	23:00	445,236	349,641
41	00:00	446,321	350,231
42	01:00	445,214	351,421
43	02:00	446,362	352,321
44	03:00	445,521	353,124
45	04:00	445,325	355,326
46	05:00	445,231	357,125
47	06:00	446,325	358,321
48	07:00	449,235	358,421

HORA	DIA 4 - 23/04/2023		
	TIEMPO	REACTOR 1	REACTOR 2
		CONCENTRACION	CONCENTRACION
1	08:30	450,231	359,321
2	09:00	450,231	360,562
3	09:30	450,324	362,321
4	10:00	451,236	363,521
5	10:30	452,324	364,325
6	11:00	453,321	364,125
7	11:30	453,214	365,325
8	12:00	455,698	364,521
9	12:30	456,325	364,523
10	13:00	457,236	365,421
11	13:30	458,321	366,325
12	14:00	459,451	368,234
13	14:30	460,325	369,335
14	15:00	462,125	369,523
15	15:30	463,253	370,213
16	16:00	458,236	371,421
17	16:30	452,324	372,523
18	17:00	460,236	372,352
19	17:30	466,332	373,263
20	18:00	467,632	374,125
21	18:30	468,632	375,632
22	19:00	475,262	376,125
23	19:30	478,325	377,324
24	20:00	476,231	378,412
25	20:30	472,362	379,632
26	21:00	474,152	379,521
27	21:30	475,321	380,321
28	22:00	477,236	380,425
29	22:30	478,362	383,362
30	23:00	474,236	384,126
31	23:30	475,632	385,321
32	00:00	478,236	383,521
33	00:30	479,632	384,523
34	01:00	479,632	385,541
35	01:30	480,632	386,625
36	02:00	488,523	386,521
37	02:30	489,632	387,632
38	03:00	488,231	388,412
39	03:30	488,324	388,634
40	04:00	490,235	387,426
41	04:30	492,321	387,632
42	05:00	491,236	389,654
43	05:30	493,254	390,632
44	06:00	498,235	390,541
45	06:30	499,321	392,632
46	07:00	509,523	395,412
47	07:30	510,231	395,321
48	08:00	511,231	395,345

HORA	DIA 5 - 24/04/2023		
	TIEMPO	REACTOR 1	REACTOR 2
		CONCENTRACION	CONCENTRACION
1	08:30	523,021	398,532
2	09:00	525,236	399,236
3	09:30	528,236	399,632
4	10:00	530,213	400,231
5	10:30	532,632	402,531
6	11:00	537,125	403,125
7	11:30	538,632	405,615
8	12:00	540,123	410,236
9	12:30	542,321	415,212
10	13:00	559,521	418,526
11	13:30	560,324	420,511
12	14:00	567,523	421,236
13	14:30	568,632	423,621
14	15:00	570,125	424,632
15	15:30	580,921	425,635
16	16:00	584,126	429,256
17	16:30	585,632	431,624
18	17:00	590,231	437,412
19	17:30	595,321	438,964
20	18:00	598,356	440,125
21	18:30	599,632	442,635
22	19:00	600,236	459,236
23	19:30	602,321	460,325
24	20:00	603,214	467,451
25	20:30	605,521	468,752
26	21:00	609,125	469,478
27	21:30	610,321	470,624
28	22:00	613,523	493,523
29	22:30	615,642	495,364
30	23:00	615,236	497,523
31	23:30	618,635	498,657
32	00:00	620,125	499,523
33	00:30	624,632	500,421
34	01:00	624,125	511,236
35	01:30	628,325	513,634
36	02:00	630,236	514,236
37	02:30	632,125	515,532
38	03:00	630,253	520,321
39	03:30	634,236	523,214
40	04:00	637,254	522,362
41	04:30	638,324	522,321
42	05:00	640,215	523,126
43	05:30	642,325	524,532
44	06:00	642,230	530,126
45	06:30	642,235	532,632
46	07:00	643,236	529,365
47	07:30	643,523	530,321
48	08:00	644,126	531,263

HORA	DIA 6 - 24/04/2023		
	TIEMPO	REACTOR 1	REACTOR 2
		CONCENTRACION	CONCENTRACION
1	08:30	642,231	532,125
2	09:00	642,236	533,210
3	09:30	642,531	533,214
4	10:00	645,523	533,212
5	10:30	648,635	533,124
6	11:00	649,221	534,263
7	11:30	649,236	534,326
8	12:00	649,895	535,052
9	12:30	650,124	535,141
10	13:00	650,236	536,426
11	13:30	651,235	536,524
12	14:00	651,240	536,632
13	14:30	651,245	536,421
14	15:00	652,239	536,352
15	15:30	652,321	537,124
16	16:00	653,210	538,532
17	16:30	653,214	538,421
18	17:00	657,235	539,421
19	17:30	658,236	539,531
20	18:00	659,341	539,421
21	18:30	659,421	539,425
22	19:00	659,402	539,365
23	19:30	659,421	539,456
24	20:00	659,326	569,632
25	20:30	659,124	540,251
26	21:00	659,236	540,231
27	21:30	660,428	540,125
28	22:00	660,456	540,632
29	22:30	660,412	541,236
30	23:00	660,596	541,251
31	23:30	661,428	541,236
32	00:00	661,562	541,536
33	00:30	661,524	542,698
34	01:00	662,125	542,236
35	01:30	662,351	542,958
36	02:00	662,253	542,321
37	02:30	663,124	542,989
38	03:00	663,125	543,236
39	03:30	664,451	543,236
40	04:00	664,235	543,123
41	04:30	665,425	544,231
42	05:00	663,125	544,632
43	05:30	664,251	545,523
44	06:00	665,421	545,632
45	06:30	665,421	545,523
46	07:00	665,236	545,362
47	07:30	666,253	545,235
48	08:00	666,325	546,236

HORA	DIA 7 - 25/04/2023		
	REACTOR 1		REACTOR 2
	TIEMPO	REACTOR 1	REACTOR 2
1	08:30	666,353	545,236
2	09:00	665,234	545,236
3	09:30	665,236	545,231
4	10:00	665,124	543,263
5	10:30	665,236	544,231
6	11:00	666,214	544,231
7	11:30	666,125	544,126
8	12:00	665,124	546,236
9	12:30	665,251	543,125
10	13:00	665,214	543,236
11	13:30	665,125	542,124
12	14:00	665,235	540,236
13	14:30	664,125	541,236
14	15:00	664,521	541,236
15	15:30	665,234	540,234
16	16:00	665,214	540,236
17	16:30	665,234	539,235
18	17:00	665,125	540,214
19	17:30	665,421	540,214
20	18:00	665,230	539,123
21	18:30	665,421	539,235
22	19:00	665,425	540,213
23	19:30	665,428	541,362
24	20:00	666,521	540,236
25	20:30	666,234	540,231
26	21:00	663,256	540,236
27	21:30	664,521	540,236
28	22:00	663,234	540,123
29	22:30	663,125	540,241
30	23:00	665,214	540,123
31	23:30	662,124	541,236
32	00:00	663,235	542,236
33	00:30	663,421	543,236
34	01:00	662,361	542,362
35	01:30	660,125	544,125
36	02:00	662,125	545,236
37	02:30	661,234	545,532
38	03:00	660,236	545,236
39	03:30	660,121	546,236
40	04:00	661,236	544,236
41	04:30	661,231	547,235
42	05:00	660,235	546,231
43	05:30	659,421	545,521
44	06:00	660,421	546,125
45	06:30	658,421	546,523
46	07:00	657,421	547,125
47	07:30	657,124	547,523
48	08:00	658,234	545,236

### Anexo 3. Panel Fotográfico

#### Reactores para la biodigestión



#### Sistema de conexión de los reactores





### Peso del residuo sólido orgánico



### Vertido del residuo sólido orgánico



### Vertido del residuo sólido orgánico



### Sellado del reactor







Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo **José Antonio Vargas Marón**, identificado con DNI N° 29376077 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

**Doctorado en Ciencia Tecnología y Medio Ambiente,**

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

**“PRODUCCIÓN DE METANO POR BIODIGESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN LA CIUDAD DE PUNO: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO Y LA EFICIENCIA PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA”**

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno, 16 de mayo del 2024

  
FIRMA



Huella



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo **José Antonio Vargas Marón**, identificado con **DNI N° 29376077** en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

**Doctorado en Ciencia Tecnología y Medio Ambiente,**

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

**“PRODUCCIÓN DE METANO POR BIODIGESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN LA CIUDAD DE PUNO: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO Y LA EFICIENCIA PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA”**

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 16 de mayo del 2024

  
FIRMA



Huella