



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**

# **DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN LA REGIÓN DE ARUSHA (TANZANIA).**

AUTORA: GLORIA LIESA TORDERA

TUTORA: MARIA ISABEL IBORRA CLAR

COTUTORA: MARIA ISABEL ALCAINA MIRANDA

**Curso Académico: 2018-19**



Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, me gustaría aprovechar la ocasión para dar las gracias a mi familia por el apoyo y la confianza depositada en mí a lo largo de estos años.

Agradecer de manera especial a mis tutoras Isabel Iborra e Isabel Alcaina por su dedicación y por su paciencia, sin las cuales este proyecto no hubiese sido posible.

También, acordarme de mis compañeros y compañeras del grado con quienes he compartido todos estos años.

Por último, dar las gracias a todos los profesores y a todas las profesoras de la titulación por haberlo hecho posible.



Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

## **RESUMEN**

En el presente Trabajo Final de Grado se ha diseñado una instalación cuyo fin es la obtención de energía eléctrica a partir de residuos orgánicos en Arusha, región que se encuentra en el norte de Tanzania, localizada cerca del parque nacional Serengueti y del monte Kilimanjaro.

Para lograr la producción de energía eléctrica se implementará un sistema compuesto por un biodigestor, un motor de cogeneración y un gasómetro. Para la obtención de biogás en el biodigestor, se necesitará una mezcla de desechos alimenticios y de cáscara de maíz como residuo orgánico. La idea de plantear el presente proyecto surge de la necesidad que presenta un país como Tanzania de diseñar una instalación que le permita adquirir energía eléctrica accesible a los núcleos familiares a la vez que reducir el impacto medioambiental causado por la deficiente gestión de los residuos.

Palabras clave: biogás, biodigestor, obtención de energía



Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

## **RESUM**

En el present Treball de Fi de Grau s'ha dissenyat una instal·lació que té com a fi l'obtenció d'energia elèctrica a partir de residus orgànics en Arusha, regió que es troba al nord de Tanzània, localitzada prop del parc nacional Serengeti i del mont Kilimanjaro.

Per aconseguir la producció d'energia elèctrica es va a implementar un sistema compost per un biodigestor, un motor de cogeneració i un gasòmetre. Per l'obtenció del biogàs al biodigestor es va a necessitar una mescla de rebutjos alimentaris i de corfa de dacs com a residu orgànic. L'idea de plantejar el present projecte sorgeix de la necessitat que presenta un país com Tanzània de dissenyar una instal·lació que li permeti adquirir energia elèctrica accessible per als nuclis familiars alhora que reduir l'impacte mediambiental causat per la deficient gestió de residus.

Paraules clau: biogàs, biodigestor, obtenció d'energia





Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

## **ABSTRACT**

In the present end-of degree Project it has been designed a system with the aim of obtaining electrical energy with organic waste in Arusha, a region in the north of Tanzania, which is located close to the National Park Serengeti and the Mount Kilimanjaro.

In order to acquire electrical energy, a system formed by a biodigester, a cogeneration motor and a gasometer will be installed. For the biogas obtention in the biodigester, it will be needed a mixture of food waste and maize husk as organic waste. The idea of setting out this project comes up from the current necessity a country such as Tanzania has of designing a system that allows obtaining electrical energy accessible to households as well as the decrease of the environmental impact caused by a deficient waste management.

Keywords: biogas, biodigester, obtaining of energy



## ÍNDICE

### DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- Memoria técnica
- Presupuesto
- Planos
- Anexos

<b>DOCUMENTO I: MEMORIA TÉCNICA.....</b>	<b>11</b>
1.OBJETIVO .....	13
2. JUSTIFICACIÓN.....	15
3. INTRODUCCIÓN .....	17
3.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN .....	17
3.2. LEGISLACIÓN MEDIOAMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE DEL PAÍS .....	21
3.3. ACCIONES FUTURAS: HORIZONTE 2030 .....	27
3.4. CULTIVO DE MAÍZ.....	29
3.4.1. Cultivo de maíz en Tanzania y en Arusha .....	31
3.5. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO: DIGESTOR ANAEROBIO Y GENERACIÓN DE BIOGÁS .....	33
3.5.1. El biogás.....	33
3.5.2. Fases del proceso .....	34
3.5.3. Condiciones necesarias para la biodigestión.....	35
3.5.4. Estructura de un biodigestor.....	36
3.5.5. Ventajas de los biodigestores.....	36
3.5.6. Desventajas, riesgos y consideraciones especiales .....	36
3.6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO: GASÓMETRO .....	37
3.7. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO: MOTOR DE COGENERACIÓN .....	38
3.7.1. Componentes de una planta de cogeneración .....	38
3.7.2. Tipos de plantas de cogeneración.....	39
3.7.5. Minicogeneración.....	39
3.7.4. Elección del motor frente a la turbina .....	41

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

4. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS .....	43
4.1. PRIMER ESTUDIO .....	45
4.2. SEGUNDO ESTUDIO .....	50
4.3. TERCER ESTUDIO .....	55
4.4. CUARTO ESTUDIO .....	59
5. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN .....	61
5.1. DATOS DE PARTIDA .....	61
5.1.1. Carga del biorreactor.....	62
5.1.2. Gestión de exceso de maíz .....	63
5.2. PARÁMETROS DE DISEÑO .....	64
5.3. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN .....	70
5.3.1. Diseño del digestor.....	70
5.3.2. Diseño de la cámara de mezcla .....	71
5.3.3. Diseño del motor de cogeneración .....	72
5.3.4. Diseño de la antorcha.....	72
5.3.5. Diseño de la torre de desulfuración del biogás.....	73
5.3.6. Diseño del gasómetro.....	73
5.4. DIAGRAMA DE FLUJO Y DE BLOQUES DE LA INSTALACIÓN.....	75
5.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	76
5.5.1. Inconvenientes .....	77
7. BIBLIOGRAFÍA .....	81
7.1. Referencias para el diseño .....	82
7.2. Referencias para el presupuesto .....	82
<b>DOCUMENTO II: PRESUPUESTO .....</b>	<b>83</b>
<b>DOCUMENTO III: PLANOS .....</b>	<b>89</b>
<b>DOCUMENTO IV: ANEXOS.....</b>	<b>95</b>
Anexo I: Especificaciones técnicas de los equipos seleccionados para la instalación.....	97
Anexo II: Estudio completo en el cual se ha basado el proyecto.....	107
Anexo III: Abreviaturas, siglas y acrónimos.....	115

# **DOCUMENTO I:**

# **MEMORIA TÉCNICA**



## **1.OBJETIVO**

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el diseño de una instalación que permita la obtención de energía eléctrica a partir de residuos orgánicos en la ciudad de Arusha, en Tanzania. Este objetivo va a desglosarse en diferentes objetivos específicos.

- Realizar un estudio sobre la realidad de la zona en cuanto a la situación medioambiental de Tanzania y de la ciudad de Arusha.
- Proponer posibles soluciones para cumplir el objetivo número 7: “Energía asequible y no contaminante”, establecido por el plan de acción Horizonte 2030.
- Realizar una búsqueda bibliográfica de diferentes investigaciones llevadas a cabo por otros autores sobre el tratamiento de corrientes de residuos urbanos y vegetales de diferentes tipos mediante una codigestión para la obtención de biogás basándose en residuos de características similares a las del país de estudio.
- Fijar las condiciones de proceso adecuadas para el diseño de la instalación con el fin de obtener el mayor porcentaje de biogás posible.
- Diseñar y presupuestar una planta piloto que permita, a partir de la corriente de biogás, la generación de energía eléctrica para suministrar a la población.





Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

## **2. JUSTIFICACIÓN**

En primer lugar, respecto a la justificación técnica, la idea de plantear el presente proyecto surge de la necesidad que presenta un país como Tanzania de diseñar una instalación que le permita obtener energía eléctrica accesible a los núcleos familiares a la vez que reduce el impacto medioambiental del país causado por la mala gestión de los residuos.

Por otro lado, en cuanto a la justificación académica, se ha realizado este Trabajo de Fin de Grado con el fin de aplicar de forma transversal los conocimientos adquiridos durante los años de estudio, ya que se han requerido los conocimientos obtenidos en diferentes asignaturas para realizarlo, siendo algunas de ellas Tecnología del Medioambiente, Experimentación en Ingeniería Química I, II y III y Control de Contaminantes en la Industria.

A continuación, se muestran imágenes que reflejan la realidad de la zona.



Ilustraciones 1 y 2. Imágenes que muestran la realidad de la zona.

Como se puede observar en las Ilustraciones 1 y 2, la presencia de residuos en las calles es bastante considerable, así como de animales de corral. Además, en la primera se puede ver a una mujer cargando con una palancana llena de plantas, posiblemente cultivo recién cosechado. Por otro lado, en la segunda foto, se puede observar que se trata de una ciudad motorizada. Ambas fotos pertenecen a la misma ciudad pero a diferentes zonas de esta.



### 3. INTRODUCCIÓN

#### 3.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN

La República Unida de Tanzania (Tanzania), es un país que se encuentra en la costa este de África central. Limita al norte con Kenia y Uganda, al oeste con Ruanda, Burundi y la República Democrática del Congo, al sur con Zambia, Malawi y Mozambique, y al este con el océano Índico. Su nombre proviene de la unión de "Tanganica" y "Zanzibar". Este último es una región semiautónoma de Tanzania que comprende un par de islas alejadas de la costa oriental de África.

Los británicos administraban el país hasta 1961, año en que se independizó de forma pacífica. La capital del país es Dodoma y la ciudad más poblada es Dar es Salaam. Los idiomas oficiales del país son el suajili y el inglés. [1]

Tanzania cuenta con importantes recursos de tierras y aguas y un elevado potencial agrícola. La agricultura es un sector clave de la economía del país. Representa el 45 % del Producto Interno Bruto (PIB) y es la fuente de los medios de vida de más de las tres cuartas partes de la población. La mayoría de la población vive aún en zonas rurales.

La dieta se basa en el consumo de cereales (maíz y sorgo), raíces feculentas (yuca) y legumbres (fundamentalmente, guisantes). El consumo de alimentos con alta densidad de micronutrientes, como los productos de origen animal y las frutas y hortalizas, es bajo y, en consecuencia, las deficiencias de micronutrientes están muy generalizadas. [2]

Además, Tanzania es el tercer país africano con mayor cantidad de animales de ganado. Entre ellos, los más comunes son el ganado vacuno, el caprino, el ovino, el porcino y el aviar. Según un sondeo realizado en 2013, el 50% de los núcleos domésticos del país poseen ganado. De este 50%, el 62% viven en zonas rurales y el 23% restante en zonas urbanas. [3]



Figura 1. Mapa de África

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

La división administrativa del país consiste en treinta regiones. Entre ellas, se encuentra la región de Arusha.



Figura 2. Mapa de Tanzania.

Arusha cuenta con una población de 1.694.310 personas, aproximadamente. Respecto a la economía de la región, la mayor parte de Arusha se dedica a la agricultura. Además, gran parte de la población rural de la región también se dedica a la ganadería. A continuación, se presentan algunos datos respecto a la economía de la región.

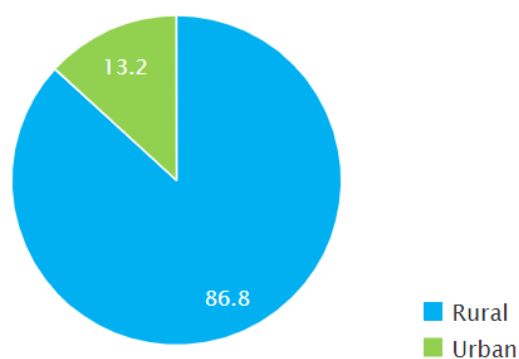


Figura 3. Núcleos domésticos poseedores de ganado y aves de corral en Arusha (%)

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

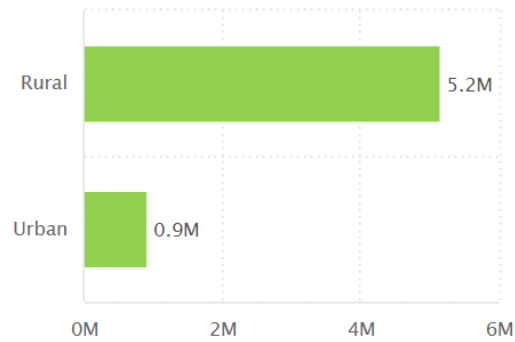


Figura 4. Núcleos domésticos relacionados con la agricultura en Arusha

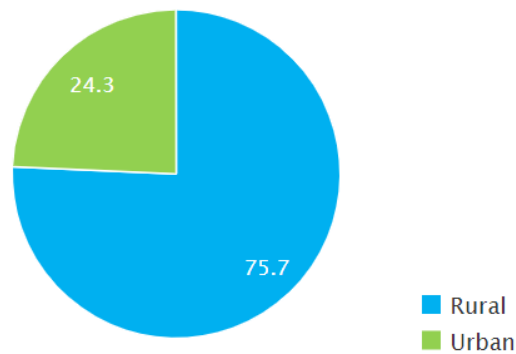


Figura 5. Núcleos domésticos relacionados con la pesca en Arusha (%)

Uno de los problemas más destacados de la región es el uso de energía y su accesibilidad. A continuación, se presentan algunos datos relacionados con las principales fuentes de energía utilizadas para las actividades domésticas, como se observa de la figura 6, para la iluminación en las viviendas, la mayor parte emplea linternas recargables, seguida instalaciones (estufas...) de leña y alguna instalación por energía solar.

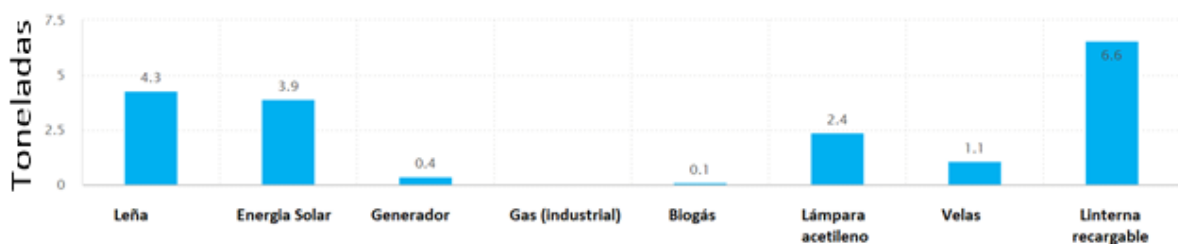


Figura 6. Principales fuentes domésticas de energía para iluminación en Arusha (%)

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

Sin embargo, como fuente energética empleada en los hogares para cocinar se utiliza la leña y el carbón vegetal, como se observa la figura 7.

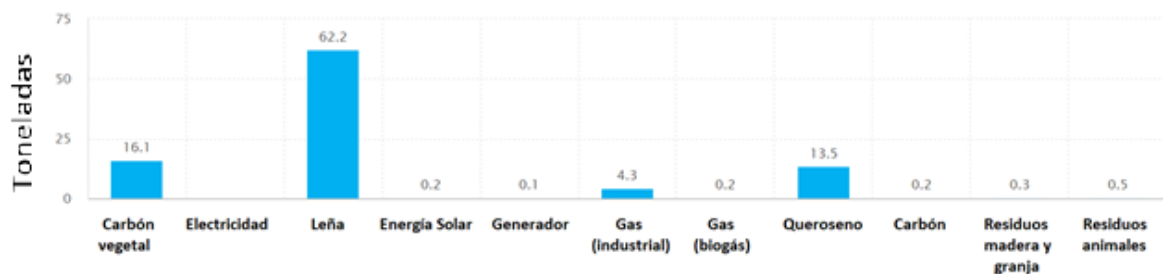


Figura 7. Principales fuentes domésticas de energía para cocinar en Arusha (%)

Otro aspecto importante a destacar es la política de gestión medioambiental del país, donde mayoritariamente es una política de concienciación. En este caso concreto en la región de Arusha, los métodos utilizados para la eliminación de desechos domésticos se basan en el quemado y enterrado de los residuos.

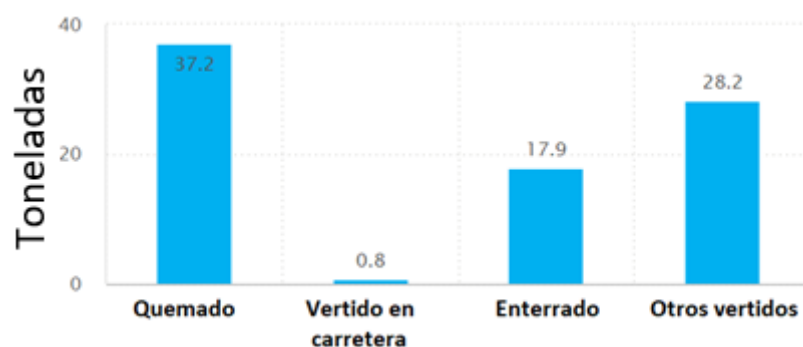


Figura 8. Tipos de eliminación de desechos domésticos en Arusha (%)

Las consecuencias medioambientales del uso del quemado como gestión de residuos son numerosas, pudiendo afectar a la atmósfera, debido a la emisión de gases contaminantes, al agua, al suelo y a los seres vivos, pudiendo provocar enfermedades en los seres humanos. Por otro lado, el vertido de residuos, de forma general, también provoca un gran impacto medioambiental. Por último, al enterrar los residuos, se contamina el suelo y, con él, el agua subterránea con sustancias tóxicas y no biodegradables. [4]

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

### **3.2. LEGISLACIÓN MEDIOAMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE DEL PAÍS**

En este apartado se va a analizar, de manera muy breve, la legislación existente en el ámbito del medioambiente y del desarrollo sostenible del país. Como se podrá observar, esta legislación se encuentra, mayoritariamente, enfocada a la concienciación de los ciudadanos.

#### 1. The National Environment Management Council Act (1983)

Este fue la primera ley que demostró el interés del gobierno por el desarrollo, tomando el medioambiente en consideración. Este Acto creó el Consejo de Gestión Nacional Medioambiental (National Environment Management Council) en 1983 con el propósito de actuar como un asesor del gobierno en todos los aspectos relacionados con medioambiente. [5]

#### 2. Tanzania National Environmental Action Plan (NEAP) (1992)

La conferencia de las Naciones Unidas en medioambiente y desarrollo (UNCED), llevada a cabo en Rio de Janeiro en 1992, cumplió la orden dada por la Asamblea General mediante la Agenda 21, un programa de acción para desarrollo sostenible en el siglo XXI. Durante la UNCED de 1992, Tanzania, junto a otros países, declaró el seguimiento del principio de desarrollo sostenible basado en el reconocimiento de que las generaciones actuales deben cumplir sus necesidades sin comprometer la oportunidad de futuras generaciones a cumplir sus propias necesidades.

Los instrumentos y estrategias claves de la política medioambiental para conseguir un desarrollo sostenible se basan en: valoración del impacto medioambiental, legislación medioambiental, instrumentos económicos, indicadores y estándares medioambientales y participación pública.

El NEAP busca, entre otras cosas:

- Integrar la política medioambiental y la estrategia de conservación en el plan
- Involucrar depositarios en la gestión medioambiental
- Promover educación medioambiental y concienciación pública
- Promover investigación e iniciativas tecnológicas
- Desarrollar y reforzar un sistema nacional de información medioambiental
- Promover la evaluación del impacto medioambiental
- Guiar el desarrollo de una legislación medioambiental
- Realizar un plan de inversión a largo plazo para una mayor concienciación medioambiental

Uno de los desafíos que Tanzania tenía que afrontar una vez terminada la Declaración de Río fue la necesidad de aproximación a una legislación para asegurar este desarrollo sostenible. El encargo que recae sobre la oficina del presidente es la elaboración de un plan de desarrollo nacional y de manejo económico. Una de las funciones de dicho encargo consiste en coordinar actividades que incluyan la integración del interés y concienciación por el plan de desarrollo.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

### 3. The National Environmental Policy (1997)

Esta política proporciona una idea para empezar a hacer cambios fundamentales necesarios con el fin de conseguir consideraciones medioambientales en la cultura dominante de toma de decisiones de Tanzania. [6]

Los seis principales problemas del país que requieren una urgente atención son:

- Degradación de la tierra
- Falta de accesibilidad a agua de buena calidad tanto para zonas urbanas como rurales
- Contaminación
- Pérdida de hábitats de vida salvaje y de biodiversidad
- Deterioro de sistema acuático
- Deforestación

Los objetivos generales de esta Política Medioambiental Nacional son:

- Asegurar el uso sostenible y equitativo de las fuentes sin la degradación del medioambiente y sin el riesgo de la salud o de la seguridad.
- Prevenir y controlar la degradación de la tierra, agua, vegetación y aire, los cuales constituyen sistemas de soporte esenciales de la vida.
- Conservar y mejorar los hábitats naturales y los construidos por el ser humano, incluyendo la diversidad biológica de los ecosistemas únicos de Tanzania.
- Mejorar la condición de productividad de las áreas degradadas, incluyendo los asentamientos rurales y urbanos de forma que todos los tanzanos puedan vivir en entornos seguros, productivos y estéticamente agradables.
- Aumentar la concienciación pública.
- Promover la participación individual y colectiva.
- Promover la cooperación internacional.

Esta política hace uso de instrumentos tales como valoración del impacto medioambiental, legislación medioambiental, instrumentos económicos y patrones e indicadores medioambientales.

El principal desafío de esta política es asegurar que todos los sectores y otros grupos interesados toman acciones de prioridad en una forma mutuamente alentadora.

Tal y como se afirma en esta política, hay una clara relación de causa-efecto entre pobreza y degradación ambiental. Por un lado, la degradación ambiental conlleva la extensión de la pobreza. Por otro lado, la pobreza es una causa habitual de degradación ambiental ya que debilita la capacidad de las personas para gestionar las fuentes sabiamente.

Por tanto, la inversión en desarrollo es vital para la protección del medioambiente, ya que éste es la principal víctima de pobreza.

Una de las formas de erradicar dicha pobreza es mediante el suministro de energía sostenible. En este aspecto, los objetivos relacionados con política de energía son los siguientes:

- Disminución del uso de leña como combustible y desarrollo de fuentes de energía alternativas
- Promoción del uso de fuentes de energía renovables
- Valoración y control del desarrollo y uso de energía



Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

- Eficiencia y conservación de la energía

#### 4. Visión 2025 (1999)

Esta es una estrategia nacional persuasiva y duradera que ejerce una consistente influencia en diferentes iniciativas subsecuentes del gobierno. Sus aspiraciones son: un gran crecimiento, sustentos de calidad, paz, estabilidad, unidad y la erradicación de la pobreza para 2025. Visión 2025 reconoce la importancia del medioambiente y el desarrollo sostenible. [7]

#### 5. Environmental Management Act (2004-2005)

Este acto revoca y reemplaza al acto de 1983. Este incluye acciones para:

- Esbozo legal e institucional para la gestión sostenible del medioambiente
- Resumen de los principios para la gestión
- Valoraciones de impacto y riesgo
- Prevención y control de la contaminación
- Gestión de residuos
- Indicadores de calidad ambiental
- Participación pública
- Cumplimiento y refuerzo
- Bases para la implementación de instrumentos internacionales en medioambiente

Además, este plan incluye un cuerpo nacional de regulación ambiental (Environmental Regulatory Body), el cual supervisa unidades medioambientales a nivel distrital y sectorial. [8]

#### 6. MKUKUTA I (2005)

Mkukuta I fue aprobado en febrero de 2005 para una implementación de cinco años. Está inspirado en la Visión 2025 y comprometido con los Objetivos de Desarrollo del Milenio. [9]

Esta estrategia identifica tres subgrupos de resultados a conseguir. Cada subgrupo tiene un conjunto de objetivos y propósitos.

Subgrupo 1: Crecimiento y reducción de la pobreza. Objetivos:

- Asegurar una gestión económica sólida
- Promover un crecimiento amplio y sostenible
- Mejorar la disponibilidad y accesibilidad de comida en zonas urbanas y rurales
- Reducir la pobreza en hombres y mujeres de las zonas rurales y urbanas
- Provisionar energía fiable y asequible

Subgrupo 2: Mejora de la calidad de vida y del bienestar social. Objetivos:

- Asegurar un acceso equitativo a la educación primaria y secundaria de niños y niñas, alfabetización universal entre hombres y mujeres y expansión de una educación mayor, técnica y vocacional.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

- Mejorar la supervivencia, la salud y el bienestar de los niños y mujeres y de los grupos especialmente vulnerables
- Aumento del acceso a agua limpia, disponible y segura, a una vivienda y a un ambiente sostenible, reduciendo la vulnerabilidad por riesgo medioambiental.
- Proporcionar protección adecuada y de los derechos a aquellos grupos más vulnerables y necesitados
- Implementación de sistemas efectivos para asegurar el acceso universal a servicios públicos de calidad.

Subgrupo 3: Gobernación y Responsabilidad. Objetivos:

- Implementación de estructuras y sistemas de gobernación, así como la regulación democrática, participativa, representativa y responsable de la ley
- Asignación de fuentes públicas de forma equitativa con corrupción controlada
- Implementación de un marco de servicio público con el fin de proporcionar servicios para aumentar las mejoras y reducir la pobreza
- Protección y promoción de los derechos de los pobres y grupos vulnerables en el sistema jurídico
- Reducción de la exclusión e intolerancia política y social
- Mejorar el personal y material de seguridad, reducción del crimen, eliminación del abuso sexual y la violencia doméstica
- Mejorar y promover la identidad de cultura nacional

## 7. MKUKUTA II (2010-2015)

Fue implementado entre 2010 y 2015. Tal y como fue MKUKUTA I, MKUKUTA II también está inspirado en la Visión 2025 y en los Objetivos de Desarrollo del Milenio. [10]

MKUKUTA I presentó resultados muy positivos. La economía aumentó de un 7%, a pesar de sufrir una crisis económica, se mejoró la provisión de servicios públicos como educación, salud, agua, energía, telecomunicaciones, etc.

Aunque esta estrategia está basada en su predecesora, ésta está más orientada al crecimiento y mejora de la productividad, con un mayor ajuste de las intervenciones hacia la creación de riqueza como forma de eliminar la pobreza.

Al igual que MKUKUTA I, esta estrategia también identifica tres subgrupos de resultados a conseguir. Cada uno de estos, presenta diferentes metas y objetivos a conseguir.

Subgrupo 1: Reducción de la pobreza. Objetivos:

- Perseguir una gestión macroeconómica adecuada
- Reducir la pobreza mediante un crecimiento del empleo
- Promover la creación y el sustento de un empleo decente, especialmente para mujeres, jóvenes y personas con discapacidad
- Proporcionar una seguridad nutricional, sostenibilidad medioambiental y la adaptación y mitigación del cambio climático

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

- Reforzar los recursos económicos nacionales para mejorar el crecimiento y aumentar los beneficios del país de comunidades en zonas rurales

Subgrupo 2: Mejorar la calidad de vida y el bienestar social. Objetivos:

- Asegurar un acceso igualitario a la educación a todos los niveles, tanto para mujeres como para hombres, así como una alfabetización universal
- Promover la expansión de educación vocacional, técnica y politécnica, así como mejorar la educación no formal y la continuidad de la educación
- Aumentar la supervivencia, la salud, la nutrición y el bienestar, especialmente para niños, mujeres y grupos vulnerables
- Aumentar el acceso a agua potable y a la higiene
- Desarrollar asentamientos humanos en ambientes sostenibles de calidad
- Proporcionar una protección social adecuada, especialmente de los derechos de grupos vulnerables y necesitados

Este subgrupo se centra en la distribución de servicios de calidad como educación, salud, nutrición, agua, sanidad, vivienda y un ambiente seguro y sostenible. En definitiva, se centra en la mejora de las condiciones de vida de las personas.

Subgrupo 3: Buena gobernación y responsabilidad. Objetivos:

- Asegurar que los sistemas y las estructuras de gobernación defienden y cumplen las leyes y asegurar que éstas son democráticas, efectivas, responsables, predecibles, transparentes, inclusivas y libres de corrupción
- Mejorar la accesibilidad de servicios públicos a todos, especialmente a los pobres y a los más vulnerables
- Promover y proteger los derechos humanos
- Proteger a nivel nacional y personas las propiedades
- Promover y preservar la cultura de patriotismo, trabajo duro, integridad moral y confianza

#### 8. National Communication Strategy on Environmental Sustainability, Growth and Poverty reduction in Tanzania (2015-2019)

Esta estrategia fue implementada como forma de concienciar e informar a los ciudadanos de la importancia del medio ambiente y de su cuidado. Este proyecto fue aprobado en 2015 con un horizonte de cinco años.

La utilización insostenible de recursos naturales causó problemas ambientales muy serios, como degradación del terreno, falta de acceso a agua de buena calidad, contaminación medioambiental, pérdida de hábitats de fauna salvaje y biodiversidad, deterioro de sistemas acuáticos, deforestación y cambio climático.

La agricultura es un sector fundamental de la economía tanzana, ya que tres cuartas partes de la población se dedican a ella. Sin embargo, unas prácticas pobres de agricultura, una utilización insostenible de recursos naturales y otras actividades incontroladas han causado serios problemas

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

medioambientales. Por tanto, este programa tiene como objetivo integrar el interés por el medioambiente de forma que se reconozcan sus beneficios en el futuro.

A pesar de todas las estrategias tomadas hasta la fecha, Tanzania sigue afrontando problemas medioambientales en términos de gestión, conservación y utilización de recursos. Muchos de estos desafíos se manifiestan como pobreza y un desarrollo económico negativo.

Sin embargo, una vez reconocida la relación que existe entre el crecimiento económico y reducción de la pobreza con la degradación medioambiental, esta estrategia se basa en la información de la relación entre Crecimiento del Medioambiente y Pobreza (E-G-P: Environment Growth and Poverty).

Dado que gran parte de la población presenta niveles muy bajos de alfabetización, es necesario usar un lenguaje simple y de fácil comprensión. Tradicionalmente, en Tanzania, son las mujeres y los niños quienes se encargan de conseguir agua, leña y de la agricultura. Por tanto, estos colectivos serán los prioritarios a la hora de la información. [11]

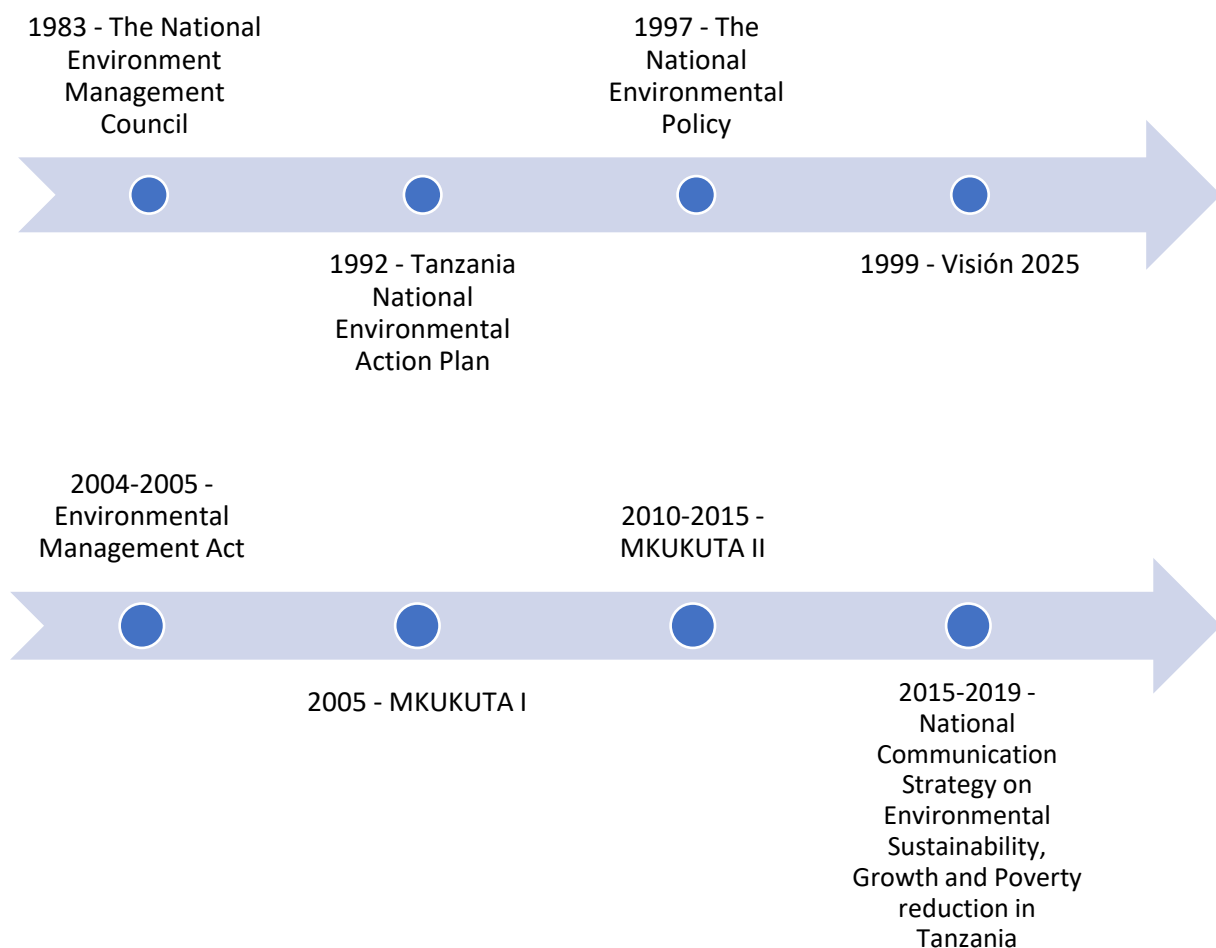


Figura 9. Resumen sobre la legislación medioambiental del país.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

### 3.3. ACCIONES FUTURAS: HORIZONTE 2030

El Horizonte 2030 es un plan de acción a nivel mundial basado en 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que se desagregan en 169 metas y que abarcan 5 esferas de acción: las personas, el planeta, la prosperidad, la paz y las alianzas. Tiene como objetivo asegurar el progreso social y económico sostenible en todo el mundo y fortalecer la paz universal dentro de un concepto más amplio de libertad. [12] [13]

Fue creado al terminar el periodo de cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) en septiembre de 2015. Más de 180 estados miembros de la ONU acordaron un nuevo plan de acción, basándose en el balance de los ODM. A este nuevo plan se le llamó Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, también conocida como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Esta Agenda guiará las decisiones a adoptar durante los próximos 15 años.



Figura 10. Objetivos Globales del Horizonte 2030. Fuente:

<https://www.oceanoatlantico.org/horizonte-2030-objetivos-desarrollo/>

Entre los 17 objetivos que se incluyen en este plan, el número 7 está destinado a garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. Respecto a este objetivo, se destacan los datos siguientes:

- El 13% de la población mundial aún no tiene acceso a servicios modernos de electricidad.
- 3.000 millones de personas dependen de la madera, el carbón, el carbón vegetal o los desechos de origen animal para cocinar y calentar la comida.
- La energía es el factor que contribuye principalmente al cambio climático y representa alrededor del 60% de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.
- La contaminación del aire en locales cerrados debido al uso de combustibles para la energía doméstica causó 4,3 millones de muertes en 2012, 6 de cada 10 de estas fueron mujeres y niñas.
- En 2015, el 17,5% del consumo final de energía fue de energías renovables.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

En referencia a estos datos, se plantearon las metas siguientes:

- De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos
- De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas
- De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética
- De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias
- De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

### 3.4. CULTIVO DE MAÍZ

El cultivo del maíz produce una gran cantidad de biomasa, de la cual el hombre cosecha apenas cerca del 50% en forma de grano. El resto corresponde a diversas estructuras de la planta tales como caña, hoja, limbos y mazorca entre otros. La producción de biomasa residual que genera un cultivo de maíz de grano (cañas, hojas, chalas y mazorcas), fluctúa entre 20 a 35 toneladas por hectárea y en el maíz de choclo (cañas y hojas) varía entre 16 a 25 toneladas por hectárea. La proporción entre los componentes del residuo depende principalmente de la variedad, nivel de fertilización y tipo de cultivar.

En la siguiente tabla, se recogen los porcentajes del peso seco del maíz en cada uno de sus componentes.

Tabla 1. Proporción de los componentes de una planta de maíz

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje del peso seco del maíz</b>
Panoja	12
Tallos	17,6
Chalas	8,9
Total caña	38,5
Mazorca	11,8
Grano	49,7
Total espiga	61,5

Cada una de estas estructuras posee características fisicoquímicas propias, lo que le confiere un valor nutritivo muy diferente, dependiendo de si el residuo corresponde a maíz de grano o maíz para consumo fresco.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

Tabla 2. Proteína bruta y digestibilidad de la materia seca en diferentes componentes del rastrojo de maíz

<b>Componente</b>	<b>Proteína Bruta (%)</b>	<b>Digestibilidad Materia Seca (%)</b>
Hojas	4,5	55,6
Tallos	3,1	59,7
Chalas	4,7	69,1
Mazorcas	4,7	58
Cañas + Hojas	4,2	55,8

La pared celular presenta un mayor porcentaje de hemicelulosa que de celulosa. El bajo porcentaje de lignina en los restos de la planta del maíz lo hace más digestible que las pajas de cereales, siendo, a su vez, más rico en azúcares solubles. Por estas razones, este residuo presenta un valor energético superior al de las pajas de cereales, fluctuando entre 1.690 y 2.100 kcal por kg de materia seca. La tasa de degradación de la materia seca a nivel del rumen es baja y lenta, alcanzando niveles del 22%, lo que afecta al consumo, que no supera los 1,2 a 1,5 kg para bovinos.

Por otra parte, y dependiendo del tipo de cultivo, en el método de cosecha y almacenamiento, la calidad puede variar considerablemente. En el maíz destinado a uso o consumo en fresco, el residuo que queda en el campo es de mejor calidad en cuanto a digestibilidad y contenido proteico, pero con diferencia de energía, ya que se ha retirado la mazorca. La digestibilidad de este residuo, así como la concentración de nutrientes, será significativamente superior a las del residuo de maíz destinado a grano.

Dos de los usos más extendidos del rastrojo de maíz son en bovinos de carne y en vacas lecheras.

Respecto a los bovinos, el rastrojo de maíz puede utilizarse en casi todas las categorías de vacunos de carne, a excepción de los terneros recién destetados. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que es un recurso fibroso, con bajo contenido de proteínas y aportes limitados de energía. Al ser utilizado en pastoreo directo, y por razones de rotación de cultivos, podrá usarse durante un corto período de tiempo antes de roturar el suelo para el siguiente cultivo. Al cosechar el rastrojo de maíz, éste puede incluirse en raciones de novillos en niveles que pueden fluctuar entre el 20 y 60%, dependiendo de la calidad del rastrojo y de los otros componentes de la dieta. Al incluir entre 20 y 30% de caña de maíz, se pueden obtener ganancias de 800 a 900 gramos por día por animal, siempre que el rastrojo se suministre picado. Al incluir en niveles de 60%, las ganancias de peso bajan a 500 - 650 gramos por día.

Respecto a las vacas lecheras, el rastrojo de maíz puede ser pastoreado directamente éstas, siempre que las mismas estén secas o tengan producciones inferiores a 15 litros por día por vaca. Al ser cosechado, debe ofrecerse picado, a fin de disminuir el rechazo. En este caso, puede incluirse en niveles de 20 - 30% en raciones de vacas lecheras que produzcan 18 - 20 litros por día, teniendo la



Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

ventaja de aportar la fibra necesaria para el funcionamiento del rumen y materia grasa de la leche, especialmente cuando las vacas reciben cantidades altas de concentrado. [14]

### 3.4.1. Cultivo de maíz en Tanzania y en Arusha

Tanzania se encuentra entre los 25 países con mayor producción de maíz del mundo de las últimas dos décadas. La producción de este cereal supone el 70% de la producción total de cereales del país. A parte del maíz, los dos cereales más cultivados en Tanzania son el sorgo y el arroz. [15]

En la Figura 11 se muestra la evolución de la producción de maíz en Tanzania entre los años 1961 y 2017.

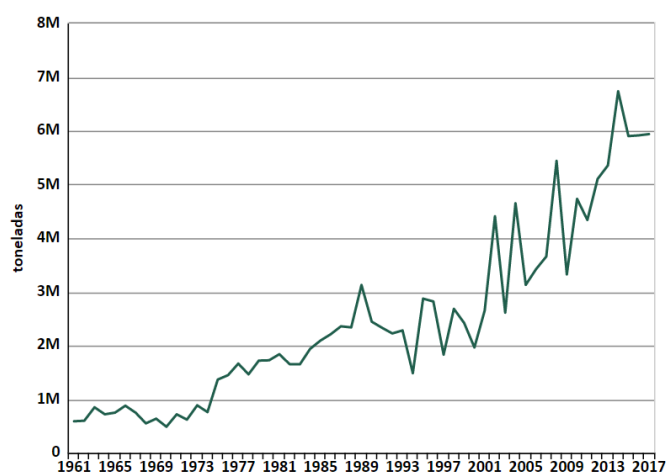


Figura 11. Evolución de la producción de maíz en Tanzania entre 1961 y 2017 [16]

Por otro lado, en la Figura 12 se muestra la evolución de la producción de maíz en Arusha entre los años 1989 y 2009, mientras que en la Figura 13 se grafica la evolución de la producción de maíz en Arusha entre los años 2001 y 2015. [17]

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

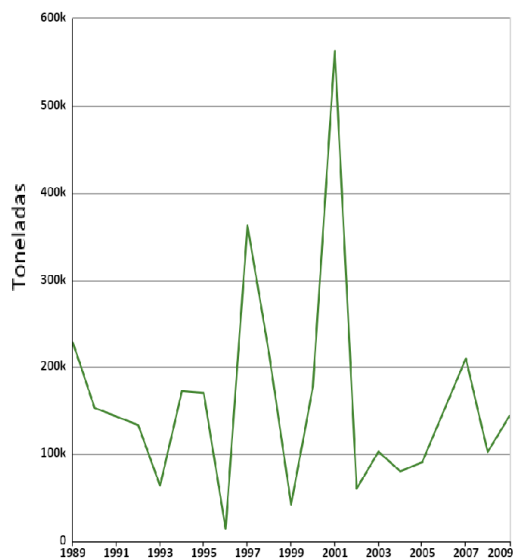


Figura 12. Evolución de la producción de maíz en Arusha entre 1989 y 2009. Fuente: <http://dataforall.org/tanzania/libraries/asp/Home.aspx>

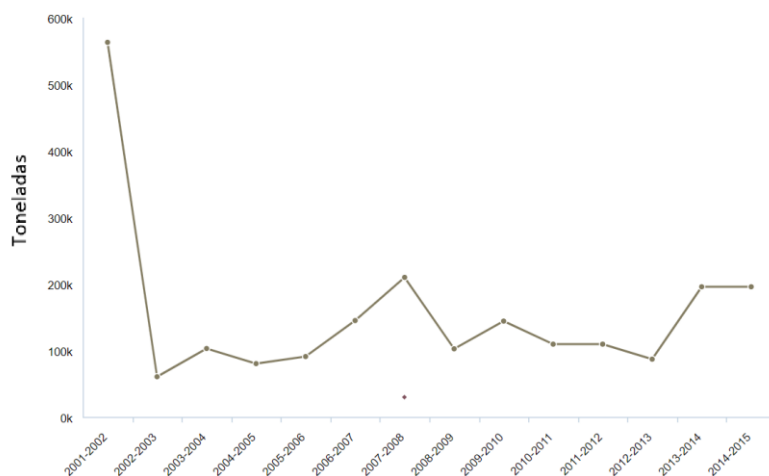


Figura 13. Evolución de la producción de maíz en Arusha entre 2001 y 2015. Fuente: <http://dataforall.org/tanzania/libraries/asp/Home.aspx>

En las Figuras 11, 12 y 13, se puede observar que, a nivel regional, la producción de maíz experimenta un decrecimiento muy pronunciado entre 2002 y 2003. Sin embargo, a nivel nacional, entre los mismos años, se experimenta un crecimiento de la producción, aunque no se trate del punto más elevado. A nivel nacional, se observa que la producción de maíz ha experimentado muchas subidas y bajadas, aunque la visión general de los años demuestra que ha crecido considerablemente, quedándose estable a partir de 2015. Sin embargo, a nivel regional, después de la gran caída entre 2002 y 2003, la producción de este cereal ha sufrido muchas subidas y bajadas, pero en ningún momento se recupera el nivel inicial entre 2001 y 2002. Por otro lado, el segundo punto más elevado obtenido fue entre 1996 y 1998, volviendo a sufrir un gran descenso en 1999.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

### 3.5. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO: DIGESTOR ANAEROBIO Y GENERACIÓN DE BIOGÁS

La digestión anaerobia (o biodigestión) es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno y, mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o "biogás" ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc.), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

El proceso controlado de digestión anaerobia es uno de los más idóneos para la reducción de emisiones de efecto invernadero, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y el mantenimiento y mejora del valor fertilizante de los productos tratados.

La digestión anaerobia puede aplicarse, entre otros, a residuos ganaderos, agrícolas, así como a los residuos de las industrias de transformación de dichos productos. Entre los residuos se pueden citar purines, estiércol, residuos agrícolas o excedentes de cosechas, etc. Estos residuos se pueden tratar de forma independiente o juntos, mediante lo que se da en llamar codigestión. La digestión anaerobia también es un proceso adecuado para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica, como las producidas en muchas industrias alimentarias. [18]

Por otro lado, la digestión anaerobia tiene lugar en un digestor anaerobio o un biodigestor. Un biodigestor, como se muestra en la Figura 14, es un contenedor hermético que permite la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas y facilita la extracción del gas resultante para su uso como energía. El biodigestor cuenta con una entrada para el material orgánico, un espacio para su descomposición, una salida con válvula de control para el gas (biogás), y una salida para el material ya procesado (bioabono). [19]

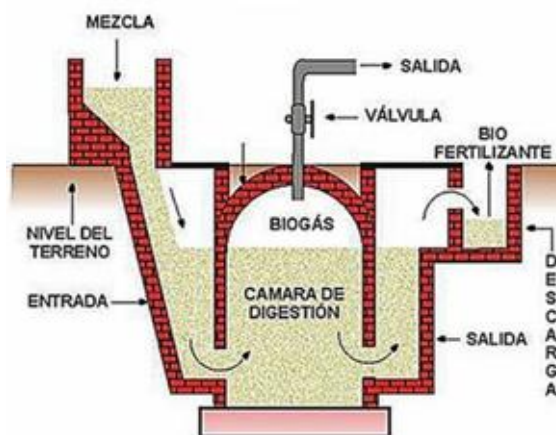


Figura 14. Esquema del funcionamiento de un biodigestor. Fuente: <https://www.aboutespanol.com/que-es-un-biodigestor-3417683>

#### 3.5.1. El biogás

Se produce a partir de la fermentación o biodegradación de la materia orgánica. Los componentes del biogás dependen del tipo de biomasa utilizada para la fermentación, las condiciones y tipo de biodigestor. El biogás que se utiliza con fines energéticos está compuesto por los siguientes gases: metano (entre 50-70%), dióxido de carbono (entre 27-45%), hidrógeno (entre 1-10%), nitrógeno (entre 0,5-3%) y ácido sulfhídrico (alrededor de 0,1%). [21]

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

Debido a su alto porcentaje en metano, CH<sub>4</sub> (entre 50-70%), el biogás es susceptible de un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas, bien sólo o mezclado con otro combustible.

Sus usos más comunes son la iluminación, la refrigeración, la cocina, la generación de calor, la operación de maquinarias agrícolas y la generación de energía eléctrica.

Un metro cúbico (m<sup>3</sup>) de biogás es igual a 6.000 kilocalorías. Haciendo una comparación de biogás con otras fuentes de energía, un metro cúbico de biogás es el equivalente de:

- 6,8 kW de electricidad
- 0,6 m<sup>3</sup> de gas natural
- 0,8 litros de gasolina
- 1,2 litros de alcohol combustible
- 0,3 kg de carbón
- 0,71 litros de fueloil
- 1,5 kg de madera

### 3.5.2. Fases del proceso

La digestión anaerobia está caracterizada por la existencia de varias fases consecutivas diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato. (Mendoza y Bes, 2013)

1. Fase de hidrólisis: las enzimas que producen las bacterias anaerobias facultativas descomponen las moléculas de alto peso molecular que se encuentran en suspensión o disueltas tales como lípidos, proteínas e hidratos de carbono.

2. Fase de acidificación: las bacterias anaerobias facultativas y estrictas forman ácidos grasos de cadena corta (como acético y butírico), alcoholes, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. De estas sustancias, las bacterias metanógenas sólo pueden utilizar acético, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> para la obtención de metano.

3. Fase acetógena: las bacterias acetogénicas convierten las moléculas orgánicas de pequeño tamaño y ácidos volátiles en ácido acético.

4. Fase metanógena: las bacterias anaerobias estrictas, muy sensibles a las condiciones ambientales, catabolizan el ácido acético para dar productos gaseosos. En esta fase, el pH óptimo de trabajo está comprendido entre 6,8 y 7,5.

En general, la velocidad del proceso está limitada por la velocidad de la etapa más lenta, la cual depende de la composición de cada residuo. Para sustratos solubles, la fase limitante acostumbra a ser la fase metanógena, y para aumentar la velocidad la estrategia consiste en adoptar diseños que permitan una elevada concentración de microorganismos acetogénicos y metanogénicos en el reactor. Con esto se pueden conseguir sistemas con tiempo de proceso del orden de días. Para residuos en los que la materia orgánica esté en forma de partículas, la fase limitante es la hidrólisis, proceso enzimático cuya velocidad depende de la superficie de las partículas. Usualmente, esta limitación hace que los tiempos de proceso sean del orden de semanas, de dos a tres. Para aumentar la velocidad, una de las estrategias es el pretratamiento para disminuir el tamaño de partículas o ayudar a la

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

solubilización (maceración, ultrasonidos, tratamiento térmico, alta presión, o combinación de altas presiones y temperaturas). [22]

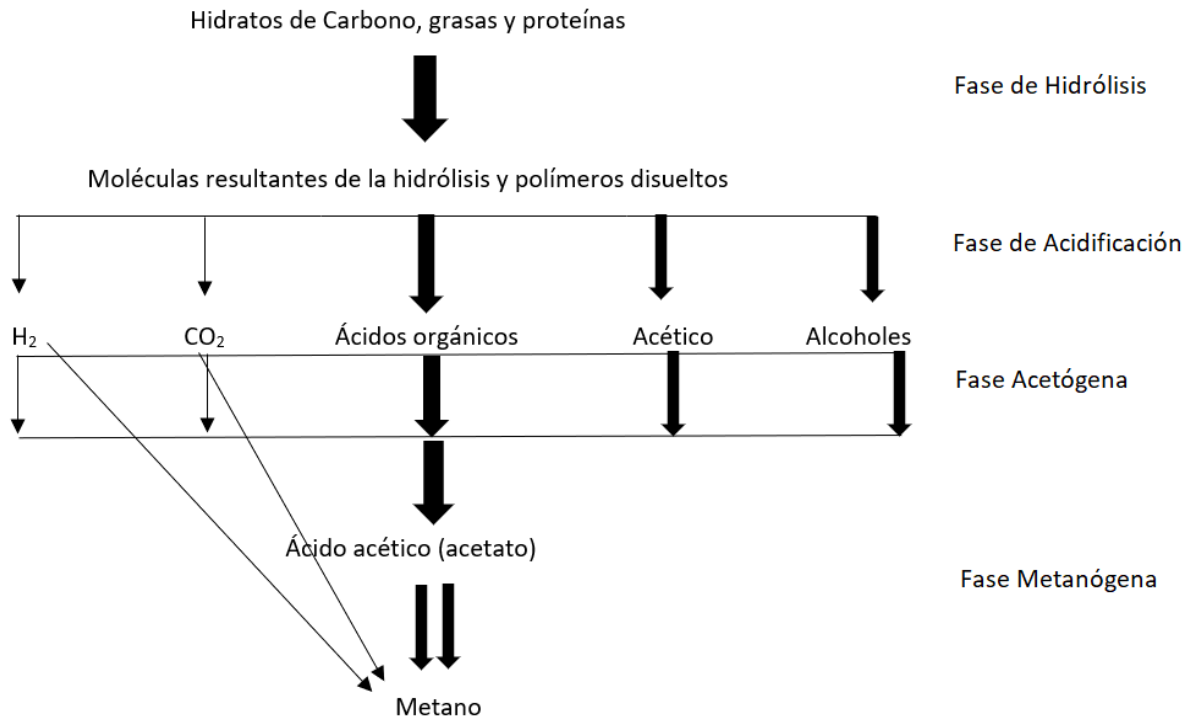


Figura 15. Fases en la descomposición anaerobia. (Mendoza y Bes, 2013)

### 3.5.3. Condiciones necesarias para la biodigestión

- Temperatura. La temperatura en la cámara digestiva debe ser entre los 20° C y 60° C; para optimizar el tiempo de producción es deseable mantener una temperatura entre los 30° C y 35° C. Es muy importante para la producción de biogás porque los microorganismos que realizan la biodigestión disminuyen su actividad fuera de estas temperaturas.
- Nivel de acidez. Determina cómo se desenvuelve la fermentación del material orgánico. El pH del material debe tener un valor entre 6.5 y 7.5. En caso de estar fuera de este rango neutro, la materia orgánica corre el riesgo de pudrirse, ya que se aumenta la actividad relativa de los microorganismos equivocados. Esto normalmente produce un olor muy desagradable.
- Condición del contenedor. Debe estar perfectamente sellado. Esto es con el fin de evitar que entre oxígeno y evitar fugas del biogás.
- Humedad. Debe oscilar entre el 80% y el 90%.
- Materiales. Los más utilizados para la producción de biogás son el estiércol de vaca, caballo, puerco y humana. También pueden usarse otros materiales orgánicos.
- Tamaño materia orgánica. Deber ser de tamaño digerible. Cuanto más pequeña sea, más rápida será la producción de biogás.
- Equilibrio. Debe existir equilibrio entre el carbono y el nitrógeno.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

#### **3.5.4. Estructura de un biodigestor**

Algunos elementos que comúnmente se pueden encontrar en un biodigestor son los siguientes:

- Cámara de fermentación. Aquí se almacena la biomasa durante el proceso de descomposición.
- Cámara de almacén de gas. Aquí se acumula el biogás formado antes de ser extraído.
- Pila de carga. Entrada donde se coloca la biomasa.
- Pila de descarga. Es la salida de la biomasa. Sirve para retirar los residuos que ya no son útiles para la producción de biogás porque están gastados, pero que pueden ser aprovechados como abono.
- Agitador. Se encarga de desplazar los residuos que se encuentran en el fondo del biodigestor hacia arriba para aprovechar toda la biomasa.
- Tubería de gas: Es la salida del biogás. Puede conectarse directamente con una estufa o bien puede ser transportado por la misma tubería a su lugar de aprovechamiento.

#### **3.5.5. Ventajas de los biodigestores**

- Es una energía renovable y sostenible
- Aprovecha la producción natural del biogás
- Los productos secundarios pueden utilizarse como abono o fertilizante
- Evita el uso de leña local
- Fomenta el desarrollo sostenible
- Redirige y aprovecha los gases de efecto invernadero producidos por los vertederos y granjas industriales. Esto reduce la huella de carbono y disminuye su contribución al cambio climático.
- Impide la contaminación de mantos acuíferos
- Crea empleos especializados

#### **3.5.6. Desventajas, riesgos y consideraciones especiales**

- Debe estar cerca de donde se recolecta la biomasa
- La temperatura de la cámara de digestión requerida puede ser limitante en lugares extremos
- El biogás contiene sulfato de hidrógeno como subproducto, el cual es corrosivo y tóxico para el ser humano
- Al ser un gas combustible, existe el riesgo de explosión o incendios por mal funcionamiento, mantenimiento o seguridad.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

### 3.6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO: GASÓMETRO

Un gasómetro es un gran recipiente donde se almacena gas a presión atmosférica y temperatura ambiente.

El gasómetro para biogás o acumulador de biogás, cumple con la función de equilibrar las fluctuaciones de la producción, el consumo y los cambios de volumen causados por variaciones de temperatura o producción. También se utiliza como acumulador de biogás para su posterior uso.

Como el consumo de gas puede ser variable en el tiempo, el gasómetro cumple la función de almacenar el biogás producido y permitir así que se satisfagan los desfases entre consumo y producción de biogás que puede existir en un momento concreto.

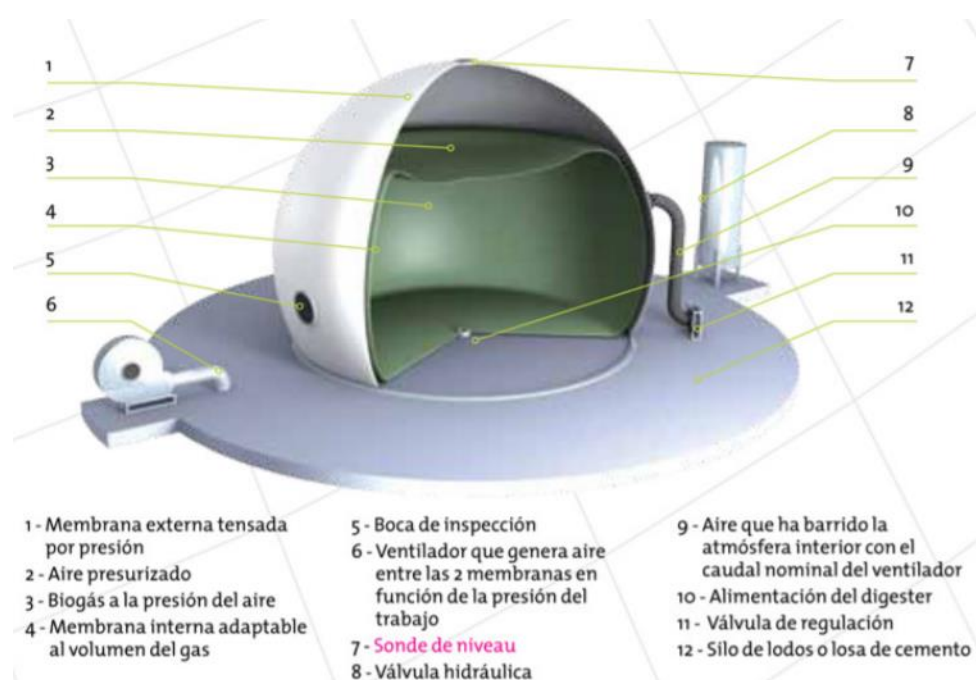


Figura 16. Partes de un gasómetro. Fuente: [http://www.mspesp.com/pdf/spt\\_gasometro.pdf](http://www.mspesp.com/pdf/spt_gasometro.pdf)

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

### 3.7. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO: MOTOR DE COGENERACIÓN

La cogeneración se define como la generación combinada de dos o más tipos de energía. Habitualmente son electricidad y calor, aunque puede ser también energía mecánica y calor (y/o frío) las energías generadas.

La producción simultánea de energía supone que la utilización pueda darse simultáneamente, lo que implica proximidad de la planta generadora a los consumos. Esto es en contraposición al sistema convencional de producción de electricidad en centrales termoeléctricas independientes donde también se desprende calor, pero éste no es aprovechado y ha de ser eliminado al ambiente. [24]

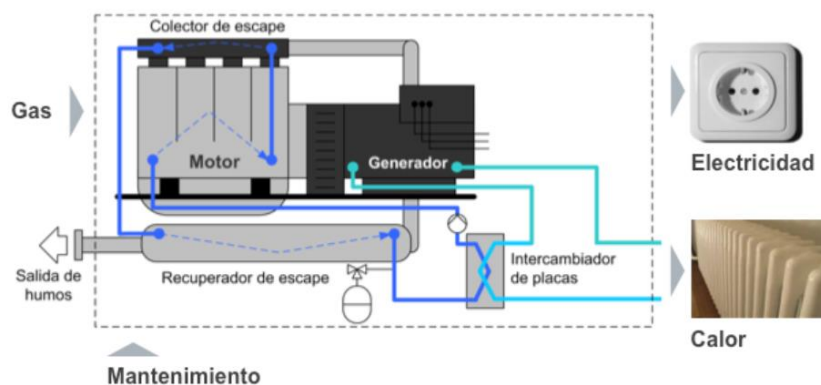


Figura 17. Esquema básico de una cogeneración. Fuente: [http://www.altarenergia.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=67&Itemid=86](http://www.altarenergia.com/index.php?option=com_content&view=article&id=67&Itemid=86)

También es posible producir frío para aplicaciones de climatización empleando máquinas de absorción o adsorción alimentadas con el calor producido por los motores. A esto se le conoce como trigeneración. La trigeneración se puede emplear tanto para cubrir demandas base de frío como para apoyar en puntas cuando los costes de las tradicionales máquinas eléctricas se disparan por el elevado precio de la energía. Es una opción a considerar tanto en industrias como en edificios del sector terciario, como hipermercados, centros comerciales u hoteles. [25]

#### 3.7.1 Componentes de una planta de cogeneración

- Fuente de energía primaria. Suele ser gas natural, gasóleo o fuelóleo.
- Elemento motor. En el elemento primario. Es el encargo de convertir la energía térmica o química en mecánica. Puede ser una turbina de gas, una turbina de vapor o un motor alternativo.
- Sistema de aprovechamiento de energía mecánica. Suele tratarse de un alternador que transforma la energía mecánica en energía eléctrica, pero también pueden encontrarse compresores o bombas donde la energía mecánica es aprovechada directamente.
- Sistemas de refrigeración. Los habituales suelen ser aerocondensadores o intercambiadores de calor. Se encargan de evacuar la parte de la energía térmica contenida en el combustible que no es aprovechada en la planta.
- Sistema de tratamiento de agua. Su misión es condicionar al fluido (generalmente agua) para el sistema de refrigeración y de aprovechamiento de calor.



Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

- Sistema de control. Se encarga del gobierno de las instalaciones, normalmente muy automatizadas.
- Sistema eléctrico. Permite tanto la alimentación de los equipos auxiliares de la planta como la exportación o importación de energía eléctrica necesaria para cumplir el balance. [24]

### **3.7.2. Tipos de plantas de cogeneración.**

- Cogeneración con motor de gas. Estas plantas utilizan gas, gasóleo o fuel-oil como combustible. Suelen ser muy eficientes eléctricamente pero poco eficientes térmicamente.
- Cogeneración con turbina de gas. En estas plantas se quema el combustible en un turbogenerador. Parte de la energía se transforma en energía mecánica para obtener posteriormente energía eléctrica. Su rendimiento eléctrico es inferior al de los motores alternativos, pero presentan la ventaja de que permiten una recuperación fácil del calor.
- Cogeneración con turbina de vapor. En estos sistemas la energía mecánica se produce por la expansión del vapor de alta presión procedente de una caldera convencional. Actualmente se utiliza como complemento en ciclos combinados o en instalaciones que usan combustibles residuales.
- Cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas y vapor. Los gases de escape de la turbina de gas pueden atravesar una caldera de recuperación, donde se produce vapor de alta presión, que podrá descomprimirse en una turbina de vapor produciendo energía eléctrica adicional.
- Cogeneración con motor de gas y turbina de vapor. En este tipo de plantas, los humos de escape del motor se introducen en una caldera de recuperación, produciendo vapor que será aprovechado en la turbina para la producción de energía eléctrica o mecánica. [23]

### **3.7.5. Microcogeneración**

Los equipos de microcogeneración generan simultáneamente electricidad y calor a partir de gas natural, propano o biogás. El gas se emplea en un motor de combustión interna que mueve un alternador produciendo electricidad. El calor se obtiene de la refrigeración del motor y de enfriar los gases de escape hasta recuperar prácticamente toda su energía residual. [25]

La microcogeneración se diferencia de la cogeneración industrial en la modularidad de los equipos, así como en la capacidad eléctrica instalada. [24]

#### 3.7.5.1. Componentes microcogeneración

- Micromotores. Son motores alternativos de combustión interna que se basan en convertir la energía química contenida en un producto combustible en energía térmica y eléctrica. Estos motores trabajan según el principio de Otto de cuatro tiempos y utilizan gas como combustible (normalmente gas natural).
- Generador. El motor acciona el generador a través, normalmente, de ruedas dentadas.
- Sistema de recuperación de calor. Son intercambiadores de calor. Su fin es recuperar la mayor cantidad posible de energía térmica en forma de calor utilizable.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

- Sistema de evacuación de gases de escape. Normalmente se usan catalizadores de tres vías. El principio químico en que se basa es la reducción de NO y NO<sub>2</sub> y la oxidación simultánea de hidrocarburos y CO.

- Cabinado y auxiliares. Es la envolvente de protección y aislamiento térmico y acústico. [25]

#### 3.7.5.2. Aplicaciones microgeneración

- Complejos deportivos especialmente si cuentan con piscinas o spas.

- Residencias de tamaño medio y grande.

- Hoteles, balnearios y complejos turísticos de tamaño medio y grande.

- Hospitales y centros sanitarios de tamaño medio.

- Áreas residenciales con instalación térmica centralizada (redes de distrito).

#### 3.7.5.3. Ventajas microgeneración

- Eficiente y limpia. La cogeneración reduce el consumo de combustible hasta en un 30% frente a la mejor generación separada. La reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> es directamente proporcional.

- Potente. Un equipo de pequeña potencia puede proporcionar resultados anuales impactantes, tanto en reducción de costes como de energía consumida y CO<sub>2</sub> emitido.

- Sencilla. Los equipos de microcogeneración se integran en las salas técnicas como una caldera más y operan de manera automática, segura y transparente integrando su producción en la instalación térmica y en la red eléctrica.

- Contrastada. Los motores industriales a gas y el resto de componentes han demostrado su fiabilidad de operación en miles de proyectos a lo largo de varias décadas.

- Rentable. La inversión en microcogeneración es contenida en comparación con otras soluciones de alcance similar y se recupera rápidamente con los ahorros de costes generados.

[24]

- Disponibilidad. La planta de microcogeneración no depende de la climatología y garantiza el suministro energético.

- Liberación de espacio. La planta ocupa unas dimensiones reducidas y no necesita invadir espacios arquitectónicamente visibles como fachadas y tejados.

- Generación distribuida de electricidad. No hay pérdidas de transporte ya que tanto la energía térmica como la eléctrica se generan junto al lugar de consumo.

- Aprovechamiento de calor y generación de electricidad de manera eficiente. Esto reporta un ahorro de energía primaria y un ahorro en emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero.

[26]

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

#### **3.7.4. Elección del motor frente a la turbina**

Para la utilización del biogás hay tres posibilidades:

- La combustión en una caldera convencional del biogás producido en el proceso de fermentación anaerobia. El calor de la caldera calienta el reactor de fermentación.
- El biogás depurado se quema en un motor alternativo produciendo electricidad y calor. El calor de los gases de escape y el del agua caliente puede ser usado para calentar el reactor manteniendo las condiciones de proceso.
- Utilización del biogás depurado en una turbina de gas o microturbina. El calor de los gases de escape puede utilizarse para calentar el reactor de fermentación. Sin embargo, la utilización de esta aplicación es poco habitual debido al riesgo que tiene la turbina en caso de fallo o funcionamiento deficiente del sistema de depuración de biogás.

La diferencia fundamental entre la turbina y el motor es que, en la turbina, la energía térmica generada está contenida casi íntegramente en los gases de escape, que salen en torno a 300°C. Esto implica que el sistema de recuperación térmica de los gases de escape debe ser sofisticado para obtener los máximos rendimientos. [25]



## **4. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS**

En el balance energético nacional de Tanzania prevalece el aprovechamiento energético de la biomasa en un 85%. Otras fuentes de energía incluyen la utilización de petróleo (9%), de electricidad (5%) y de energías renovables (1%).

En un país como este, la extracción insostenible de fuentes de energía puede provocar un impacto medioambiental negativo, como degradación, deterioro del sistema acuático, cambio climático y contaminación.

En Tanzania, la leña y el carbón vegetal son las principales fuentes de energía de los núcleos familiares en las áreas rurales, conformando un 85% del consumo total de energía.

El gobierno, en un plan de concienciación y de reducción del impacto medioambiental, tiene intención de sustituir el consumo de leña y de carbón vegetal supliendo con energía eléctrica, gas y productos de petróleo. Esto es importante ya que una gran dependencia en biomasa contribuye a la deforestación. Con el uso en incremento de electricidad y de gas, el gobierno espera que la leña y el carbón vegetal conforme sólo un 49% del consumo total de energía para 2040, para así reducir el problema de la deforestación.

Por otro lado, la gestión de residuos se está convirtiendo en una preocupación seria en Tanzania debido a la limitada clasificación de fuentes y al inapropiado almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y vertido final. Esto implica que una proporción significativa de residuo generado se desecha de manera inapropiada, lo que provoca el aumento de impacto medioambiental y de riesgos para la salud.

Para solucionar dichos problemas, cabe tener en cuenta que entre las fuentes de energía renovable, la digestión anaerobia, o codigestión, de residuos de sustancias orgánicas para la obtención de biogás ha resultado ser, aparentemente, la más popular. Esto es debido a la generación de biocombustible, a la reducción de la contaminación medioambiental y a la mejora de la productividad agrícola, ya que el compost del digestato es usado como abono.

El biogás se compone de, aproximadamente, un 60% de metano, y tiene un valor energético de entre 5,4 y 6,4 kWhm<sup>-3</sup>. Dado que este dato es cercano al valor energético del gas natural (5,7–7,7 kWhm<sup>-3</sup>), el biogás podría ser usado como sustituto del demandado gas natural.

Cabe destacar que la producción de biogás y su contenido en metano son los factores principales para realizar adecuadamente la evaluación económica y de viabilidad técnica en plantas de digestión anaerobia a gran escala.

El producto principal del proceso de digestión es un gas compuesto, principalmente, de metano y de dióxido de carbono. Sin embargo, también están presentes el ácido sulfhídrico, el amoníaco, el hidrógeno y el monóxido de carbono.

Además, los residuos alimenticios contienen sustancias altamente degradables y un bajo contenido en nitrógeno. Por esto, se ha comprobado que, con substratos complementarios como residuos de

## Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

plantas con una biodegradabilidad menor y un contenido en nitrógeno mayor, en la codigestión se elevan enormemente la producción de biogás y la estabilidad del digestor.

Concretando, se ha comprobado que la codigestión mejora la producción de metano con el uso de rastrojo o cáscara de maíz en vez de sólo con substrato debido a mejoras en las características del reactor. Además, se demostró que con la codigestión se reduce el tiempo de puesta en marcha, así como la acumulación de ácidos grasos volátiles. Además, también se encontró que incluyendo hasta un 60% de residuos alimenticios en la materia prima, añadiendo estiércol diariamente, se obtenía una producción mayor de biogás.

Por otro lado, se ha demostrado que la monodigestión de residuos alimenticios es ineficiente e inestable debido al bajo ratio C/N y a la fracción de compuestos orgánicos volátiles. Estos llevan muy a menudo a la acidificación del proceso de fermentación.

Comparando el biogás y el gas de síntesis, ambos pueden ser usados tanto para calefacción como refrigeración, así como para producir electricidad. Esto se obtiene mediante dos procesos competitivos: digestión anaerobia y gasificación. Además, ambos tienen aplicaciones similares desde el punto de vista de producción de energía. Tienen diferentes componentes combustibles, diferentes requerimientos de limpieza del gas y diferentes poderes caloríficos. Asimismo, su aplicabilidad y las condiciones de producción puede variar dependiendo del tipo de biomasa. Por otro lado, el biogás es el combustible usado para cocinar más barato, con un precio de 0,15€/persona/día.

La razón por la que se ha decidido optar por el biogás y no por el gas de síntesis está recogida en la investigación llevada a cabo por Juan Camilo Solarte-Toro, Yessica Chacón-Pérez y Carlos Ariel Cardona-Alzate, en su artículo llamado "Evaluation of biogas and syngas as energy vectors for heat and power generation using lignocellulosic biomass as raw material" ("Evaluación del biogás y del gas de síntesis como vectores de energía para la generación de calor y energía usando biomasa lignocelulósica como materia prima"). En dicho estudio experimental, se llevó a cabo una simulación para obtener biogás y gas de síntesis usando un residuo lignocelulósico, tanto en la digestión anaerobia como en los procesos de gasificación. Posteriormente, dichos gases fueron usados para la obtención de energía. Observando los resultados obtenidos, los autores llegan a la conclusión de que, debido al valor energético del biogás, éste es más apropiado para la obtención de energía. Sin embargo, el coste del gas de síntesis es inferior. Por tanto, la selección de uno u otro dependerá de los intereses en cada caso. Así, en este proyecto, se va a usar el biogás.

Por las razones citadas anteriormente, se va a llevar a cabo una digestión anaerobia. Con ella, se obtendrá biogás evitando un impacto medioambiental agresivo y, además, se podrá contribuir en la gestión de residuos orgánicos.

Para determinar la manera óptima de obtención de energía mediante residuos orgánicos, se ha realizado búsqueda bibliográfica sobre diversas investigaciones llevadas a cabo por diferentes autores. Con ello, se determinarán las condiciones óptimas de producción de biogás para el diseño de nuestra instalación. A continuación, se expone cada uno de estos estudios.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

#### 4.1. PRIMER ESTUDIO

Título: Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production (“Co-digestión en estado sólido de residuos biológicos y de residuos alimenticios para la producción de biogás”)

Autores: Dan Brown y Yebo Li.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412014319?via%3Dihub>

Este estudio fue respaldado por el Centro de Investigación y Desarrollo Agrícola de Ohio y por el Programa de la Tercera Frontera de Ohio.

El objetivo de este estudio es determinar la relación óptima entre materia prima (feedstock) y efluente (E) (F/E) y la relación óptima entre los residuos biológicos y los residuos alimenticios para la obtención óptima de biogás.

Para ello, se realizó un estudio que consistía en una codigestión de residuos biológicos y alimenticios que es llevada a cabo con diferentes ratios F/E. Estos ratios son de 1, 2 y 3. Para cada uno de ellos, se usaron porcentajes del 0%, 10% y 20% de residuo alimenticio en base seca de sólidos volátiles. La duración del experimento fue de 30 días.

Los autores demostraron que, con un ratio de 2, se consigue mejor rendimiento de metano acumulativo que con ratios mayores, como de 4 o 6. El estudio también demostró que la codigestión mejora la composición de metano en comparación con el uso del residuo alimenticio como único sustrato, ya que mejora las características del reactor. También se demostró que la codigestión de residuo biológico y residuo alimenticio reduce el tiempo de inicio, así como la acumulación de ácidos grasos volátiles en la digestión anaerobia.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

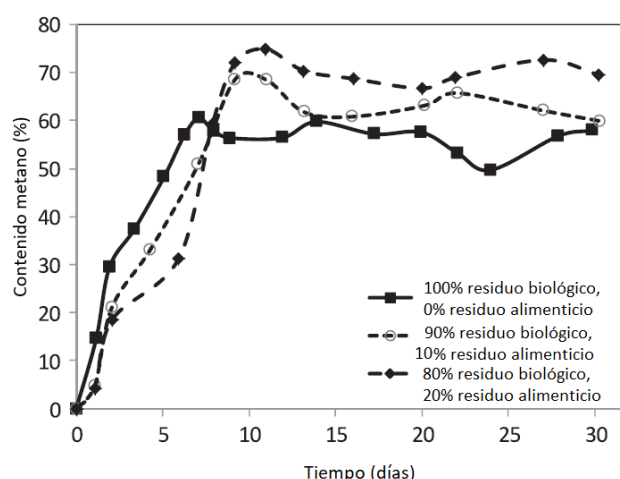


Figura 18. Composición de metano en biogás durante 30 días para un ratio de 1.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

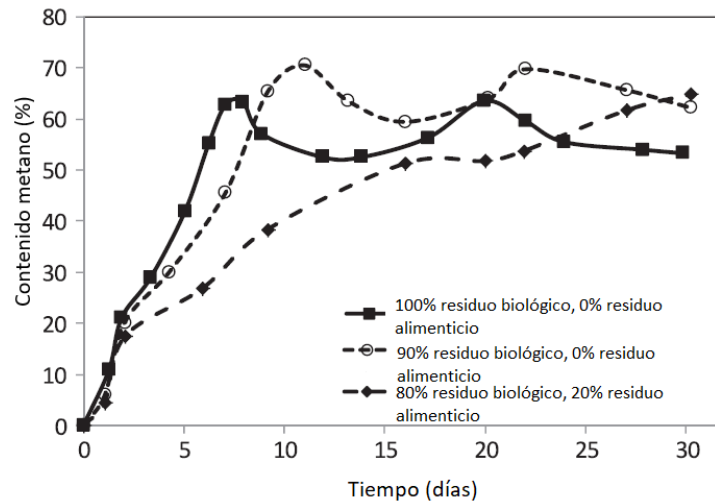


Figura 19. Composición de metano en biogás durante 30 días para un ratio de 2.

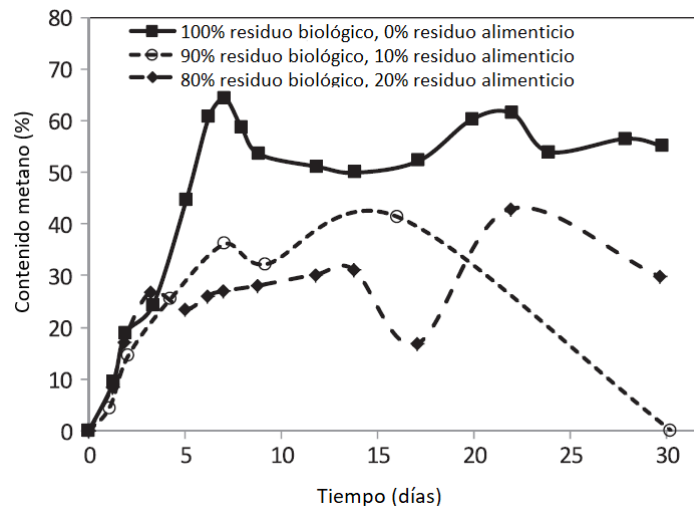


Figura 20. Composición de metano en biogás durante 30 días para un ratio de 3.



Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

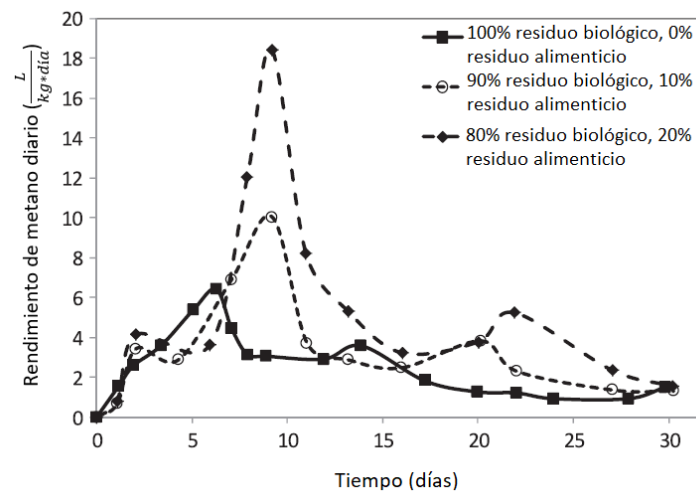


Figura 21. Rendimiento de metano diario durante 30 días para un ratio de 1.

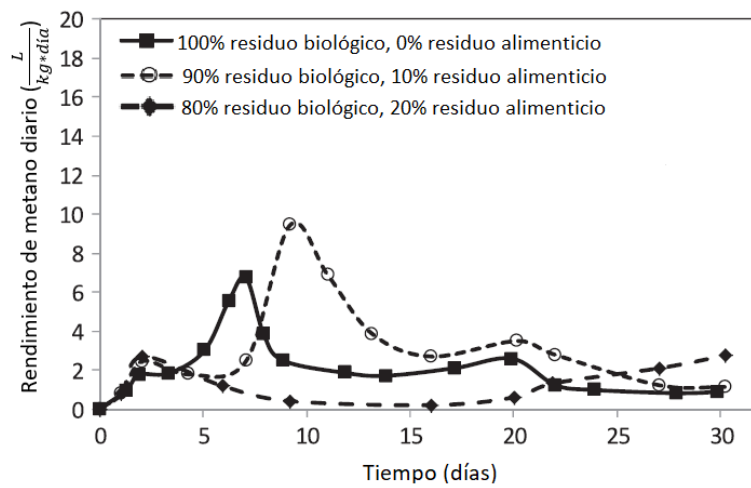


Figura 22. Rendimiento de metano diario durante 30 días para un ratio de 2.

## Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

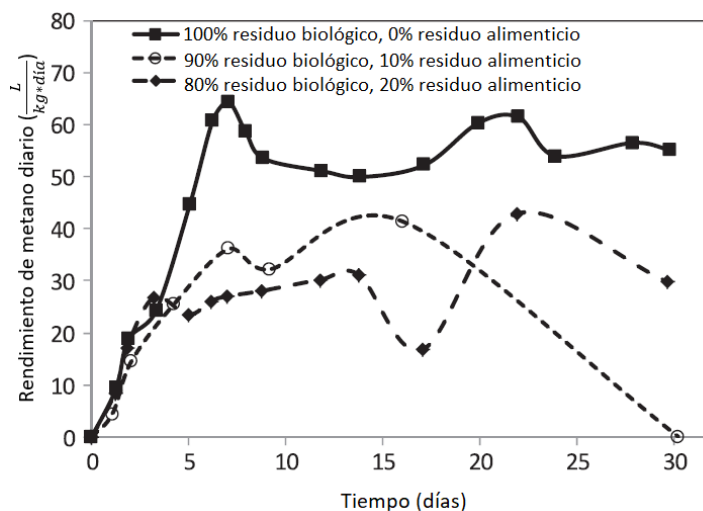


Figura 23. Rendimiento de metano diario durante 30 días para un ratio de 3.

En las Figuras 18 a la 23 se recogen los resultados obtenidos por Brown y Li.

Para empezar, en las Figuras 18, 19 y 20 se muestra el contenido de metano presente en el biogás producido en los digestores cargados con ratios 1, 2 y 3, respectivamente. La mayoría de los digestores tiene un contenido de metano entre el 50% y el 70% entre los días 8 y 30, lo que es considerado como estable y constante, con la excepción de los reactores con un 20% de residuo alimenticio en un ratio 2 y los reactores con un 10% y un 20% de residuo alimenticio en un ratio 3.

La mayor cantidad de contenido de metano en un estado estable (67% y 65%) se encuentran en los reactores con un 20% de residuo alimenticio en ratio 1 y con un 10% de residuo alimenticio en ratio 2, respectivamente. Los reactores con un 100% de residuo biológico en ratios 1, 2 y 3 tienen contenidos similares de metano (56-58%).

Las Figuras 18, 19 y 20 muestran claramente que la adición de residuo alimenticio hasta un 20% en ratio 1 y hasta un 10% en ratio 2 incrementa el contenido de metano en biogás.

Por otro lado, tal y como se observa en la Figura 21, para un ratio 1, el incremento de la cantidad de residuo alimenticio en un 20% y un 10% provoca un aumento de un 2,8 y de 1,5, respectivamente, en la producción más elevada de metano. Por otro lado, la adición de residuo alimenticio también provoca un retraso en el punto más álgido de producción de metano, desde 6,3 días (0% residuo alimenticio) hasta 9,2 días (10% y 20% residuo alimenticio). Este retraso puede ser debido a la rápida hidrólisis de un material más fácil de digerir. La adición de residuo alimenticio también conlleva un mayor rendimiento diario de metano.

En la Figura 22 se muestra el rendimiento diario de metano para un ratio 2. El digestor que opera con un 20% de residuo alimenticio tiene un valor de punto álgido de producción significativamente inferior al digestor con un 0% de residuo alimenticio. Además, el digestor del 20% presenta una producción de biogás de casi 0 desde el día 10 hasta el 20, cuando éste empieza a incrementar. Por otro lado, el digestor con un 10% de residuo alimenticio presenta un aumento de un 1,4 respecto al que presenta

## Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

un 0%. El tiempo requerido para alcanzar el punto más alto de producción diaria oscila entre 6,7 y 9,4 días cuando se añade un 10% de residuo alimenticio.

Por último, la Figura 23 muestra el rendimiento diario de metano para un ratio 3. El único digestor que mantiene la producción de metano durante los 30 días es el cargado con un 100% de residuo biológico. Los otros dos digestores pararon de producir metano cerca del día 8, sugiriendo que un porcentaje mayor de residuo alimenticio en ratios mayores podría introducir cantidades excesivas de material fácilmente digerible y causar el fallo del digestor.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

#### 4.2. SEGUNDO ESTUDIO

Título: Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste (“Producción de biogás en una codigestión de fracción orgánica de residuo sólido municipal y residuo de frutas y verduras”)

Autores: Suelen Pavi, Luis Eduardo Kramer, Luciana Paulo Gomes, Luis Alcides Schiavo Miranda.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.003>

Este estudio fue realizado mediante una beca soportada por el Instituto de Educación Internacional (IIE). Fue llevado a cabo en el programa de posgraduación de ingeniería civil en la universidad de Vale do Rio dos Sinos, en Brasil.

Para este estudio, se usó una fracción orgánica de residuos sólidos municipales (OFMSW) y residuos de fruta y verdura (FVW) como sustratos. FVW fue elaborado en el laboratorio con una mezcla de plátano (20%), papaya (20%), manzana (10%), col (12%), lechuga (12,5%), cebolla (12,5%) y patata (12,5%). Una vez recolectados tanto el OFMSW y el FVW, fueron introducidos en un procesador de comida doméstico con el fin de reducir el tamaño de las partículas. A continuación, los residuos fueron almacenados en un refrigerador por debajo de una temperatura de 4°C.

El inóculo fue obtenido experimentalmente en una digestión anaeróbica a escala piloto, tratando los residuos alimenticios en condiciones mesófilas. El inóculo fue almacenado durante 15 días en un contenedor con una tapa semiabierta con el fin de desprenderse del biogás presente.

El experimento fue llevado a cabo en cuatro lotes en reactores de cristal con un volumen de trabajo de 2L. Después de la alimentación, cada reactor fue cerrado y el biogás fue medido por el método del desplazamiento de agua. Los reactores fueron guardados en un baño de agua termostático con una temperatura de operación fijada en 35°C.

Cuatro ratios diferentes de OFMSW/FVW fueron analizados: 1/0, 1/1, 1/3 y 0/1. El ratio de sustrato e inóculo (S/I) fue de 1/1.

Cada reactor fue agitado manualmente durante un minuto dos veces al día. Cerca de 300 mL de biogás fueron recogidos diariamente en bolsas de muestra para la medida de la cantidad de metano presente en el biogás. Luego, 50 mL del digestato fueron recogidos de cada reactor diariamente para el análisis del pH. La duración del experimento oscila entre los 12 y los 17 días, dependiendo del reactor.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

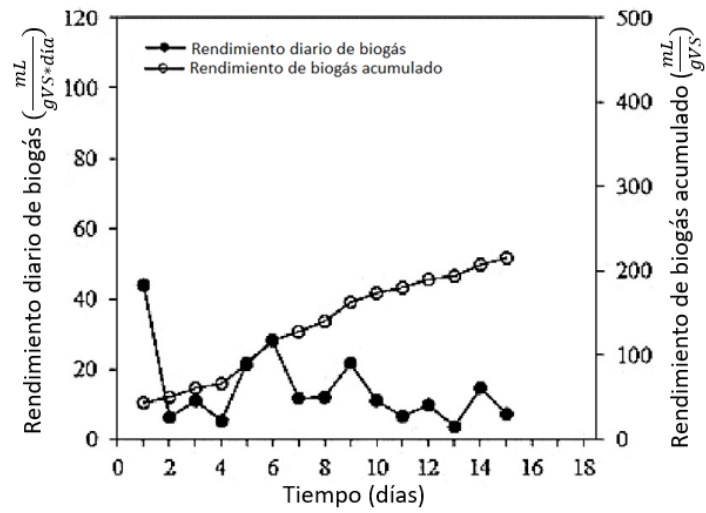


Figura 24. Resultados obtenidos para un ratio 1/0

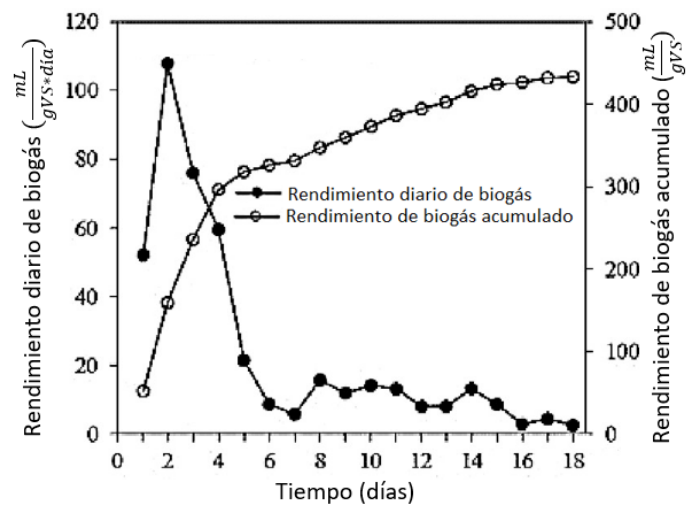


Figura 25. Resultados obtenidos para un ratio 1/1

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

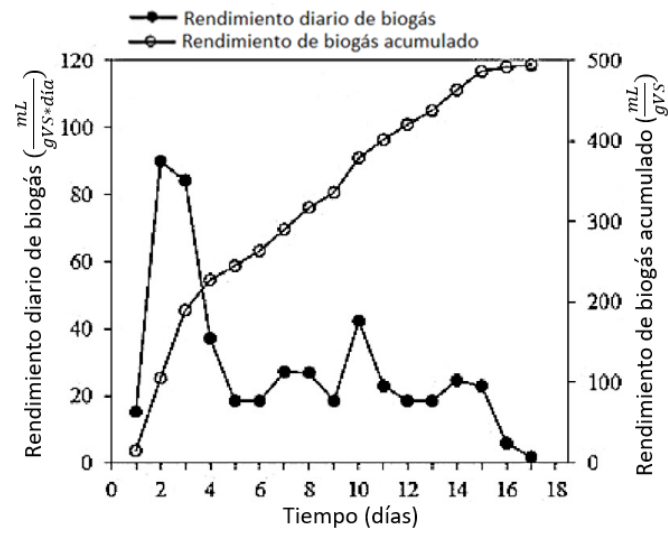


Figura 26. Resultados obtenidos para un ratio 1/3

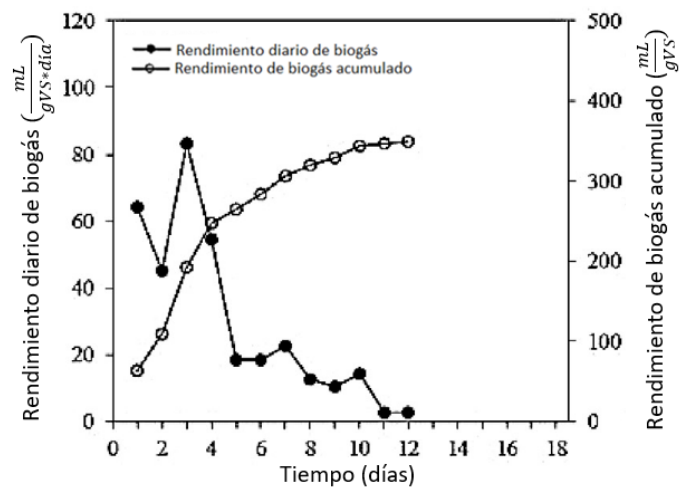


Figura 27. Resultados obtenidos para un ratio 0/1

Tabla 3. Resultados obtenidos en los reactores para diferentes ratios de OFMSW/FVW

Ratio	Tiempo (días)	Rendimiento de biogás acumulado (mL/g)	CH <sub>4</sub> (%)	Rendimiento de metano acumulado (mL/g)
<b>1/0</b>	15	215 (21)	76,5 (1,7)	164,5 (14,3)
<b>1/1</b>	18	433,9 (17,9)	80,8 (1,4)	350,6 (13,6)
<b>1/3</b>	17	493,8 (17,3)	79,7 (1,5)	396,6 (13,6)
<b>0/1</b>	12	350 (33)	78,7 (2)	275,9 (28,6)

Observando las Figuras 24, 25, 26 y 27, se comprueba que el reactor en el que solo se añade OFMSW se obtiene la menor duración (12 días). Esto era de esperar dado que la hidrólisis y la consecuente fermentación alcohólica de frutas y verduras ocurre a una velocidad mucho mayor que en los otros sustratos orgánicos. En todas las condiciones, la producción de biogás empieza inmediatamente después de la alimentación de los reactores.

La monodigestión (ratios 1/0 y 0/1) resulta en una producción promedio de biogás inferior que la codigestión, como muestra la Figura 25. Después de 12 días de digestión, la monodigestión de residuos de frutas y verduras (350 mL/gSV) demuestran que el promedio de biogás acumulado es un 63% mayor que la de residuos sólidos orgánicos municipales (215 mL/gSV). El rendimiento de biogás acumulado promedio de la codigestión en un ratio 1/1 fue de 433,9 mL/gSV, como muestra la Figura 25. Bajo esta condición, el metano promedio contenido en biogás fue máximo, con un 80,8%. Tal y como se observa en la Figura 26, el ratio óptimo es de 1/3, obteniendo un promedio acumulado de rendimiento de biogás de 493,8 mL/gSV. Esto representa un incremento de un 130% y un 41% respecto a las monodigestiones de residuos de fruta y verdura y de residuos sólidos orgánicos municipales, respectivamente. Observando los resultados obtenidos para un ratio 1/1, el incremento de rendimiento de biogás promedio acumulado es de un 14%.

Estos resultados indican que la adición de residuos orgánicos sólidos municipales no afectan negativamente al rendimiento de biogás acumulado.

En los reactores se observa que la producción de biogás es considerablemente mayor durante los primeros 4 días de experimento, donde el punto álgido se encuentra en el segundo día.

Tal y como se muestra en la Tabla 3, el contenido promedio de biogás producido en todos los reactores se encuentra entre el 76,5% y el 80,8%. La codigestión resulta en un contenido de metano mayor, comparado con la monodigestión. Además, el menor rendimiento de metano acumulado se obtiene en la monodigestión de residuos sólidos orgánicos municipales.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

En conclusión, la codigestión incrementa el rendimiento de biogás y el rendimiento de biogás acumulado comparando con la monodigestión. Además, el ratio 1/3 muestra los resultados óptimos, alcanzando el mayor valor promedio de rendimiento de metano.



Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

### 4.3. TERCER ESTUDIO

Título: Optimal combination of food waste and maize husk for enhancement of biogas production: Experimental and modelling study. (“Combinación óptima de residuo alimenticio y cascara de maíz para mejorar la producción de biogás: estudio y modelo experimental”)

Autores: H.I. Owamah y O.C. Izinyon.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2015.10.001>

Este estudio fue realizado en el departamento de ingeniería civil de la universidad de Benín en Benín, ciudad de Nigeria.

El estudio está enfocado a la optimización de la producción de biogás en una codigestión de residuo alimenticio y de cáscara de maíz. La codigestión se llevó a cabo en cinco digestores diferentes, del A al E, con una proporción de residuo alimenticio: cáscara de maíz (RA:CM) de 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100, respectivamente. Luego, el estudio utilizó el modelo modificado de Gompertz, con el fin de simular y ajustar los datos experimentales para determinar los parámetros cinéticos relevantes para predecir la actuación de los digestores.

Los huesos y los materiales inorgánicos de los residuos alimenticios fueron almacenados durante las 24 horas posteriores a su recolección. Esto fue seguido por un demolidor y un homogeneizador usando una mini licuadora eléctrica. Los residuos alimenticios licuados fueron almacenados en un refrigerador a una temperatura de 4°C aproximadamente, antes del inicio de la digestión anaerobia. Por otro lado, la cáscara de maíz fue molida a polvo usando un molinillo. A continuación, fue almacenado en un contenedor hermético hasta que fue usado para el experimento.

Los experimentos fueron conducidos en cinco reactores digestores idénticos de 10 L con 5 L de volumen de trabajo, usando un ordenador que controlaba los digestores anaeróbicos. La corriente fue establecida para un máximo de 7 L al día, con el fin de llenar los reactores de 5 L en un período de 18-20 horas.

La duración de las digestiones anaerobias fue de 44 días, cuando el biogás obtenido no era significativo ni medible todavía. La digestión anaerobia fue mantenida a una temperatura mesófila de 37°C aproximadamente, mediante un baño en agua. El volumen de biogás fue obtenido mediante el método de desplazamiento de agua del tanque volumétrico del digestor anaeróbico. El factor de conversión para determinar el volumen de biogás generado es de 0,01628 L por milímetro. Esto significa que por un milímetro que cambie la altura del tanque, hay un desplazamiento de 0,01628 L, equivalente al biogás producido.

No se utilizó ningún inóculo en el primer experimento porque el objetivo es solo encontrar la combinación óptima de ambos sustratos para la producción de biogás. La cantidad de metano de biogás fue analizado dos veces por semana.

En la Ecuación 1 se muestra el modelo de Gompertz, usado para la estimación de parámetros cinéticos importantes para la digestión anaerobia.

$$\text{Ecuación 1} \quad A_t = A \exp \left\{ - \exp \left[ \frac{R_m \times e}{A} (\lambda - t) + 1 \right] \right\}$$

## Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

A: producción potencial máxima de biogás (L/gSV)

$R_m$ : producción máxima específica de biogás (L/(gSV\*día))

$\lambda$ : latencia (días)

t: tiempo de producción de biogás (días)

$A_t$ : producción de biogás acumulativa (L/gSV)

La Ecuación 1 fue usada cuidadosamente para ajustar los datos experimentales de este estudio con el fin de determinar los parámetros cinéticos importantes necesarios para diseñar la digestión y la operación óptima de plantas anaeróbicas a gran escala que tratan con residuos alimenticios y cáscara de maíz como sustratos.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

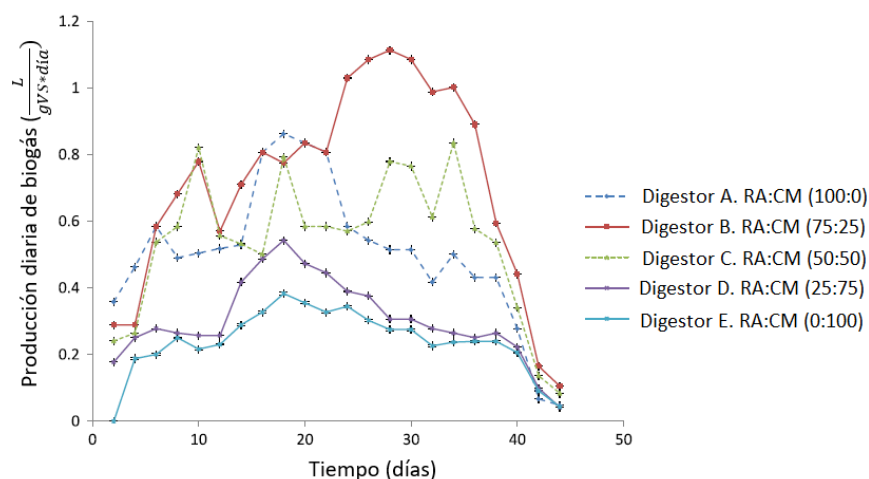


Figura 28. Producción de biogás diaria para los diferentes ratios.

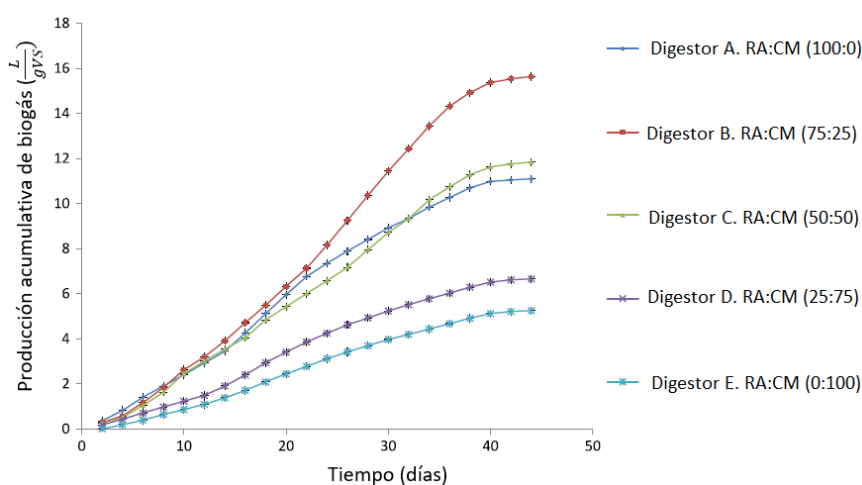


Figura 29. Producción acumulativa de biogás para los diferentes ratios.

## Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

Como bien puede observarse en la Figuras 28 y 29, el digester B presenta la mayor producción de biogás en comparación con los otros digestores, seguido por el digester C. El digester que presenta los peores resultados es el E, con un 100% de cáscara de maíz.

Después de 44 días de digestión, el biogás total producido por los digestores A, B, C, D y E resultó en 11,1, 15,64, 11,84, 6,65 y 5,24 L/gSV, respectivamente. La producción acumulativa de biogás, representada en la Figura 26, también indica claramente que el digester B tiene una mayor eficiencia en cuanto al biogás producido en comparación con los otros digestores.

Por otro lado, se puede observar que los digestores D y E también presentan los porcentajes mayores de cáscara de maíz. Esto muestra que la cáscara de maíz puede ayudar a mejorar el potencial de producción de biogás de los residuos alimenticios. Sin embargo, una proporción elevada de cáscara de maíz en relación con residuo alimenticio puede llevar a la inhibición y/o reducción de la producción de biogás en el digester.

Después de 32 días de digestión, el 88,4%, el 85,9%, el 85,8%, el 86,8% y el 84,4% de la producción de biogás fue obtenido en los digestores A, B, C, D y E, respectivamente.

Aparte del digester B, que obtuvo su punto álgido de producción de biogás en 1,11 L/gSV en el día 28, los digestores A, C, D y E tuvieron su punto más alto de producción de biogás en 0,86, 0,79, 0,54 y 0,38 L/gSV respectivamente, en el día 18 de la digestión anaerobia. El digester C, sin embargo, presentó diferentes puntos álgidos de magnitud similar.

La mayor producción de biogás en el digester B podría atribuirse a una mejor sinergia de microorganismos en el digester como resultado de la presencia de una cantidad limitada de cáscara de maíz, lo que lleva a una mejora del ratio de C/N de 23,4. Además, el digester B no solo tuvo la mayor producción promedio de biogás, sino también se obtuvo un biogás más limpio, en términos de contenido de metano.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos una vez aplicado el modelo de Gompertz, así como los valores cinéticos.

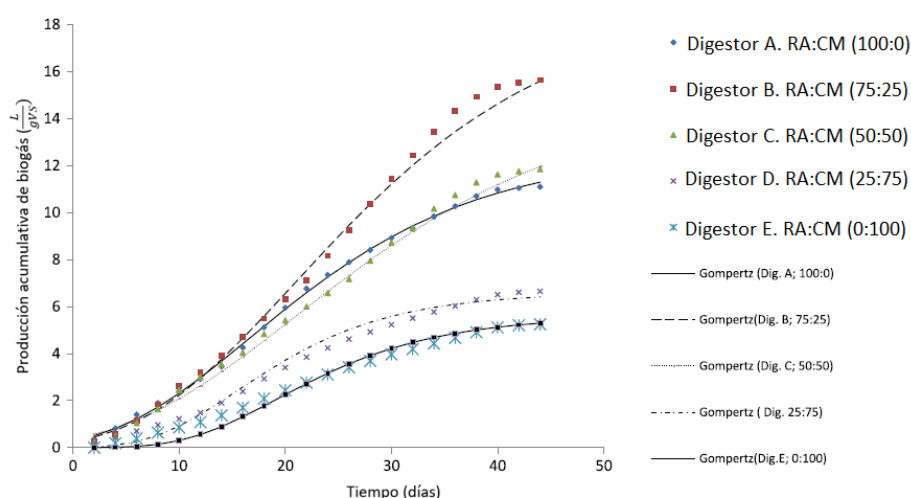


Figura 30. Simulación de los datos experimentales con el modelo modificado de Gompertz para los diferentes ratios.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

Tabla 4. Parámetros del modelo modificado de Gompertz para diferentes ratios.

Digestor	Ratio	A	R <sub>m</sub>	λ	R <sup>2</sup>
A	100:0	12,64	0,37	4,1	0,9989
B	75:25	20,71	0,5	4,9	0,9969
C	50:50	15,29	0,36	6,9	0,9965
D	25:75	6,6	0,3	7,4	-
E	0:100	5,6	0,24	10,6	0,9913

Cuando los residuos alimenticios son digeridos solos como en el digestor A, se obtuvo un valor de R<sub>m</sub> de 0,37 L/(gSV\*día). Una mejora de la R<sub>m</sub> se observa en el digestor B, con un valor de 0,5 L/(gSV\*día). Después de esta combinación óptima en el digestor B, un incremento del porcentaje de la cáscara de maíz en los digestores C, D y E reduce el valor de la R<sub>m</sub>.

Además, el modelo modificado de Gompertz muestra que la digestión de residuo alimenticio solo (digestora) tiene un potencial máximo de producción de biogás (A) de 12,64 L/gSV. Sin embargo, un buen incremento a 20,71 L/gSV fue obtenido en el digestor B. Dado que la cantidad de la cáscara de maíz incrementa más del 50% en el sustrato, el potencial máximo de producción de biogás (A) empezó a reducirse.

En conclusión, la mayor cantidad promedia de biogás obtenida fue en el digestor B. Además, los valores mayores de R<sub>m</sub> y de A también se obtuvo en el digestor B, con una proporción de un 75% de residuo alimenticio y un 25% de cáscara de maíz.

Se ha demostrado que incrementar el contenido de cáscara de maíz más de 25% conlleva un decrecimiento de A y de R<sub>m</sub> y un incremento de la latencia (λ).

#### 4.4. CUARTO ESTUDIO

**Título:** The effect of organic loading rates on the performances of food wastes and maize husks anaerobic co-digestion in continuous mode. (“El efecto de las cargas en las actuaciones de residuos alimenticios y de cáscara de maíz en una codigestión anaeróbica en modo continuo”)

**Autores:** H.I. Owamah y O.C. Izinyon

<http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2015.06.002>

Este estudio fue realizado en el departamento de ingeniería civil de la universidad de Benín en Benín, ciudad de Nigeria.

Este estudio es llevado a cabo por los mismo autores que el estudio anterior. Además, se utilizan los mismo resultados obtenidos. Dado que en el estudio anterior se han obtenido los resultados más satisfactorios, se va a llevar a cabo un estudio más detallado de los digestores con cargas de proporción 100:0, 0:100 y 75:25. Es decir, de las monodigestiones y de la codigestión con los resultados más favorables.

En este caso, el digestor A será aquel con una proporción de 100:0, el digestor B aquel con una proporción de 0:100 y el digestor C aquel con una proporción 75:25.

Dado que se trata del mismo experimento que el anterior, el proceso de preparación y de implementación de la digestión será el mismo para este caso.

En el estudio más detallado, se han observado las siguientes variables: ácidos grasos volátiles (AGV) (mg/L), alcalinidad (mg/L), nitrógeno amónico (NA) (mg/L), pH, tasa de carga orgánica (gSV/L\*día).

A continuación, se muestran los valores obtenidos para esas variables.

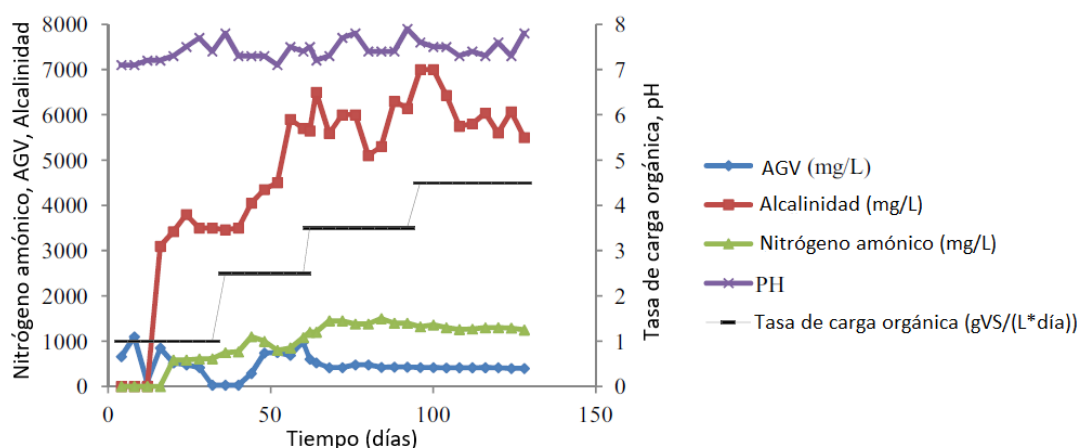


Figura 31. Valores de los parámetros obtenidos en la digestión anaerobia.

El experimento de la digestión anaerobia continua fue llevado a cabo para investigar la actuación del digestor bajo tasas de carga orgánica de 1, 2,5, 3,5 y 4,5 gSV/(L\*día). Se observó que el pH fluctuaba entre 0,4g de CaCO<sub>3</sub>/L y 6,7 g CaCO<sub>3</sub>/L. Esto muestra que el proceso de digestión no experimenta

## Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

ninguna inhibición por acidificación. Durante las diferentes cargas orgánicas, el ratio AGV/Alcalinidad mostró un rango de 0,06-0,22. Fue reportado por otros autores que un ratio AGV/Alcalinidad inferior a 0,4 era apropiado para una digestión anaerobia viable y podría usarse para evaluar la estabilidad del digestor. Esto quiere decir que un ratio AGV/Alcalinidad inferior a 0,4 significa que el digestor podría ser estable.

El rango de la concentración total de nitrógeno amónico fue de 0,3 a 1,3 g/L, en respuesta al incremento de las tasas de carga orgánica. Fue demostrado que este rango resulta mejorar la estabilidad del digestor, ya que actúa como amortiguador.

El efecto inhibitorio ocurre normalmente cuando la concentración de nitrógeno amónico es mayor de 6 g/L. La mayor cantidad de biogás obtenida 0,72 L/gSV en la tasa de carga orgánica de 4,5 gSV/(L\*día) es relativamente mayor que la producción máxima de biogás de 445 mL/gSV, obtenido en una tasa de carga de 4 gSV/(L\*día).

El contenido de metano producido en biogás para tasas de carga de 1, 2,5, 3,5 y 4,5 gSV/(L\*día) es de 63,5, 63,7, 63,8 y 67, respectivamente. Solo hubo un ligero crecimiento en el contenido de metano y en la producción de biogás cuando la tasa de carga incrementó de 1 a 2,5 gSV/(L\*día).

Un incremento significativo en la producción de biogás fue obtenido cuando la tasa de carga fue incrementada de 2,5 a 4,5 gSV/(L\*día), lo que indica la adaptación de los microorganismos a condiciones de mayor tasa de carga.

En conclusión, la producción de biogás y la valoración de la estabilidad del digestor en la codigestión de residuos alimenticios y de maíz tuvieron lugar en una tasa de carga orgánica de 1-4,5 gSV/(L\*día). El pH y la alcalinidad total se encontraron entre 7,3 y 7,5 y entre 0,4g CaCO<sub>3</sub>/L y 6,7g CaCO<sub>3</sub>/L, respectivamente, demostrando que el proceso de digestión no experimenta inhibición por acidificación.

El ratio entre los ácidos grasos volátiles y la alcalinidad se encontró entre 0,06 y 0,22. Este rango es inferior al límite máximo recomendado de 0,4 y, por tanto, demuestra que la digestión con una proporción 75:25 fue estable y podría ser utilizado a gran escala en la producción de biogás.

## 5. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

### 5.1. DATOS DE PARTIDA

Arusha es una ciudad cuya mayor deficiencia medioambiental es disponer del vertedero muy cerca de la zona residencial debido al pobre plan urbano del que disponen.

Así, la ciudad de Arusha presenta una población de 507.903 habitantes, según el censo nacional de 2012. El índice de generación de residuos sólidos es de unas 550 toneladas/día, con un índice de generación promedio de 1,08 kg/persona/día. Además, presenta una capacidad de recolección de residuos de alrededor de 302 toneladas/día, lo que implica un 54,8% del total de residuos generados, con un 16% de capacidad de reciclaje. Los residuos sólidos incluyen desechos domésticos, que consisten en residuos alimenticios degradables, hojas y cadáveres de animales; y residuos no degradables, como plásticos, botellas, nylon y residuos industriales y comerciales.

A continuación, en la Figura 32, se muestra una aproximación de los porcentajes de cada residuo sólido producido.

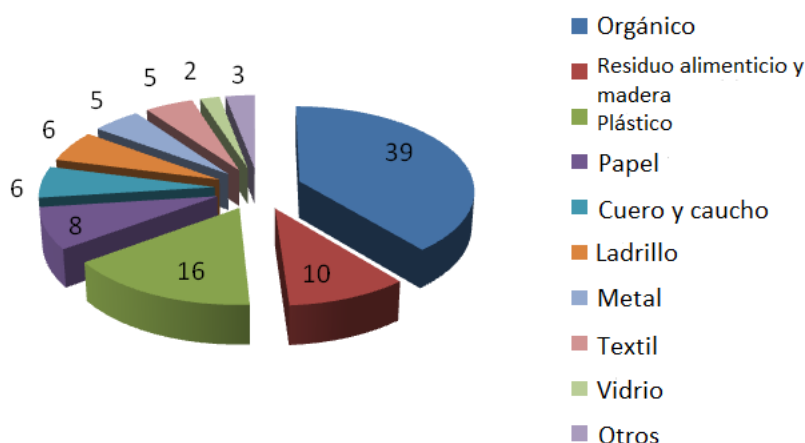


Figura 32. Composición de los residuos sólidos de la ciudad de Arusha. Fuente: Plan Estratégico y Recuperación Económica de la ciudad de Arusha.

En la Figura 32 se observa que casi un 40% de los residuos sólidos producidos corresponden a residuos orgánicos. A este le siguen los residuos sólidos de plástico, con un 16%. En tercer lugar se encuentran los residuos alimenticios y forestales, suponiendo un 10% de la producción total de residuos. Estos datos fueron recopilados en diciembre de 2016. Se puede suponer que la producción de residuos no haya variado en gran cantidad en los últimos tres años debido a la situación económica y medioambiental del país y de la ciudad.

Para el diseño de la instalación se va a tener en cuenta tanto los residuos orgánicos como los alimenticios. Así, se dispondrá de un 49% de la cantidad total de producción de residuos.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

Por otro lado, volviendo a la Figura 13, se observa que entre 2014 y 2015 hubo una producción de maíz en Arusha de alrededor de 200.000 toneladas anuales. Esto implica unas 547.945 toneladas/día. Se va a tomar este dato debido a la no disposición de datos más recientes.

Además, volviendo a la Tabla 1, se obtiene que el porcentaje de peso seco de la panoja, la flor masculina de la planta, es del 12%, de las chalas es del 8,9% y de los tallos es del 17,6%. Es decir, la caña en su totalidad conforma un 38,5% del porcentaje de peso seco de la planta.

Sin embargo, durante el proceso de recolección, las chalas, que son la cubierta de hojas duras de la mazorca de maíz, se recogen junto a ésta para su consumo. Por tanto, no se considerarán como residuo.

Se podría tener en cuenta la mazorca como residuo pero, para ello, habría que implementar un plan para su recuperación, lo cual no parece viable en la actualidad.

### 5.1.1. Carga del biorreactor

Volviendo a los datos proporcionados anteriormente, se producen 550 toneladas/día de residuos, de las cuales sólo se recogen 302 toneladas/día. Teniendo presente que un 49% corresponden a los residuos orgánicos y alimenticios, se tendrá una cantidad de residuos de 147,98 toneladas/día.

Por otro lado, se tiene una cantidad de residuo de maíz de 547.945 toneladas/día. De esta cantidad solo se tendrá en cuenta el porcentaje en peso correspondiente a la panoja (12%) y a los tallos (17,6%), lo que corresponde a un 29,6% del total. Así, la cantidad final de residuo de maíz será de 162,19 toneladas/día.

Teniendo en cuenta las Figuras 28 y 29, se observa que las condiciones óptimas para el diseño de la instalación son de una proporción de un 75% de residuo alimenticio y de un 25% de cáscara de maíz.

Para optimizar las cantidades, se va a considerar que el 75% de residuo alimenticio corresponde con unas 150 toneladas/día disponibles. De esta forma, la cantidad de mezcla total será de unas 200 toneladas/día.

Así, el 25% de esta cantidad total es de unas 50 toneladas/día, cantidad de residuo de maíz necesaria para el proceso. Teniendo en cuenta que la cantidad total de residuo de maíz producida es de 162,19 toneladas, habrá un exceso de 112,19 toneladas al día, ya que la cantidad limitante en este caso es la producción de residuos orgánicos.

A modo de conclusión, nuestra instalación se realizará para una cantidad de, aproximadamente, **150 toneladas/día de residuo orgánico** y para una cantidad de **50 toneladas/día de residuo de maíz**. Por tanto, la cantidad total será de **200 toneladas/día**.



Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

### **5.1.2. Gestión de exceso de maíz**

Suponiendo el caso ideal en que se recolectaran los residuos en su totalidad, se dispondrían de 550 toneladas/día. Teniendo en cuenta el 49% de residuos orgánicos y alimenticios, se tendrían 269,5 toneladas/día. Siendo esta cantidad el 75% de la mezcla total, ésta sería de 359,33 toneladas/día. Aplicando el 25% a esta cantidad total, se necesitarían 89,83 toneladas/día de residuo de maíz. Dado que la cantidad total disponible de residuo de maíz es de 162,19 toneladas, seguiría habiendo un exceso de 72,36 toneladas/día en este caso, es decir, 40,51 toneladas al día menos.

Sin embargo, en el caso real, la cantidad total de residuo de maíz producida es de 162,19 toneladas, por tanto, habrá un exceso de 112,19 toneladas al día, ya que la cantidad limitante en este caso es la producción de residuos orgánicos.

Cabe tener presente que los residuos de maíz juegan un rol muy importante en la preservación de la productividad del suelo. Los residuos amortiguan el impacto del viento y de las gotas de lluvia que tienden a erosionar el suelo. También contribuyen a mantener la materia orgánica del suelo, el carbón orgánico del suelo y los niveles de nutrientes deseables para lograr cierta productividad del suelo. De este modo, el exceso de residuo alimenticio podría emplearse para asegurar futuras cosechas.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

## 5.2. PARÁMETROS DE DISEÑO

Volviendo al artículo en el cual nos basaremos para el diseño de la instalación, es decir, el cuarto estudio desarrollado en el apartado anterior, y retomando los resultados obtenidos por este, se toman como base los siguientes parámetros:

Las cargas orgánicas en los reactores implicados en la digestión anaerobia fueron introducidas de forma gradual con sustratos preparados de cuatro cargas orgánicas diferentes de 1, 2,5 3,5 y 4,5 gSV/L\*día y fue operado durante 120 días. Las tasas de carga orgánica significan la cantidad de sólidos orgánicos cargados por litro de volumen de reactor por unidad de tiempo.

Los reactores de los digestores fueron llevados a cabo de forma estable a una temperatura mesófila de 37°C mediante un baño de agua. El sustrato fue alimentado continuamente mediante una bomba peristáltica y registrado mediante un ordenador.

Los sólidos totales iniciales presentes en los sustratos de alimentación fueron mantenidos en un 8% mediante dilución con agua con el fin de conseguir el rango específico de sólidos totales y de incrementar la fluidez de los sustratos para facilitar el bombeo de las bombas peristálticas.

El volumen de biogás producido fue medido diariamente a mediodía mediante el método del desplazamiento de agua en el tanque volumétrico del digestor anaerobio. El agua desplazada fue inicialmente acidificada a un pH 3 usando ácido clorhídrico antes de la adición de cloruro sódico para prevenir la disolución de CO<sub>2</sub> en agua.

El contenido de metano en biogás fue analizado dos veces por semana usando cromatógrafo de gas. Por otro lado, la cantidad total de nitrógeno amoniacal, la alcalinidad total y los ácidos grasos volátiles en el digestor fueron analizados dos veces a la semana.

A continuación se presentan en la Tabla 5 las características químicas de la mezcla utilizada en el estudio.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

Tabla 5. Características de ambas fracciones de la mezcla.

<b>Parámetro</b>	<b>Residuo orgánico</b>	<b>Residuo de maíz</b>
Sólidos totales (%)	26,6±0,3	10,5±1,2
Sólidos volátiles (%)	18,4±1,2	8,6±0,8
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (%)	1,7±0,2	0,8±0,2
Nitrógeno total Kjeldahl (%)	1,8±0,2	0,7±0,2
Cl (%)	1,3±0,3	1,8±0,5
P (%)	2,9±0,1	3,7±0,1
Ca (%)	3,4±0,5	0,8±0,3
Mg (%)	1,6±0,2	1,9±0,1
K (%)	3,5±0,3	2,3±0,1
S (%)	3,8±0,1	4,1±0,4
Na (%)	3,4±0,3	2,7±0,2
pH	4,8±0,1	7,2±0,9
Ratio C/N	13±0,4	74,3±2,1

Retomando los datos de partida y teniendo en cuenta los valores de alimentación del estudio, se obtiene la Tabla 6.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

Tabla 6. Características de los sustratos de alimentación para el proceso de digestión anaerobia.

Sustrato de alimentación	Valores de los parámetros
Residuo orgánico: Residuo Maíz	75:25
Peso total de la muestra (toneladas/día)	200
Peso residuo orgánico (toneladas/día)	150
Peso residuo de maíz (toneladas/día)	50
Sólidos Volátiles (%)	6,8
Ratio C/N	23,4
pH	6,8
Ratio Inóculo/Sustrato	1

Como bien se comprobó en el tercer estudio, el digester que presentó unos resultados óptimos fue el digester B, con una proporción de un 75% de residuo orgánico y un 25% de residuo de maíz. Esto puede deberse al elevado ratio de C/N, como puede observarse en la Tabla 6, que se encuentra por encima del rango de 20-35. Y, además, también está influenciado por el contenido de lignina, la cual es una sustancia natural que forma parte de la pared celular de muchas células vegetales, a las cuales da dureza y resistencia. Mientras que un elevado valor del ratio de C/N puede resultar en una acidificación, lo cual inhibe las actividades metanogénicas, el contenido en lignina inhibe la hidrólisis inicial de los sustratos.

La presencia de residuo de maíz está implicada en la obtención de un ratio C/N de la mezcla sustrato de 23,4, valor que está comprendido entre el rango requerido para una obtención de biogás óptima (20-35).

Una vez terminado el estudio para saber en qué digester se dieron las condiciones óptimas de producción de biogás, se realizó un análisis estadístico usando el método de variación de ANOVA sin replicación. Con este, se obtuvieron los valores de los siguientes parámetros: eliminación de sólidos totales (%), eliminación de sólidos volátiles (%), tiempo de residencia (días), productividad de biogás volumétrico ( $L_{\text{biogás}}/L_{\text{volumen reactor}}$ ), alcalinidad ( $g_{\text{CaCO}_3}/L$ ), cantidad de nitrógeno amónico (g/L), cantidad de ácidos grasos volátiles (g/L), ratio alcalinidad/ácidos grasos volátiles y pH. Estos parámetros se midieron para tasas de carga orgánica de 1, 2,5, 3,5 y 4,5.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los experimentos realizados.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

Tabla 7. Condiciones de operación y resultados obtenidos del proceso de digestión anaerobia.

Tasa de carga orgánica (gSV/L*día)	Eliminación de sólidos totales (%)	Eliminación de sólidos volátiles (%)	Tiempo de residencia (días)	Productividad biogás volumétrico (Lbiogás/Lvolumen reactor)	Alcalinidad (gCaCO <sub>3</sub> /L)	Nitrógeno amónico (g/L)	Ácidos grasos volátiles (g/L)	Alcalinidad/ácidos grasos volátiles	pH
1	78,2±2,2	80,7±4,5	68	0,7±0,02	0,4±0,64	0,3±0,11	0,5±0,13	0,22±0,03	7,31±0,07
2,5	72,2±3,1	76,5±2,8	27	1,53±0,02	4,5±0,37	0,9±0,06	0,5±0,14	0,11±0,01	7,39±0,08
3,5	68,5±2,6	74,3±3,1	19	2,4±0,01	5,8±0,15	1,4±0,04	0,5±0,02	0,09±0,01	7,41±0,08
4,5	75,2±1,8	78,3±1,6	15	3,4±0,02	6,7±0,19	1,3±0,01	0,4±0,03	0,06±0,01	7,5±0,05

Tabla 8. Producción promedio de biogás y contenido de metano obtenido en el proceso de digestión anaerobia.

Tasa de carga másica (gSV/L*día)	Producción promedio de biogás (L/gSV)	Error estándar L/gSV (producción biogás)	Contenido de metano (%)	Error estándar % (contenido metano)
1	0,63	0,06	63,5	2,6
2,5	0,64	0,06	63,7	2,8
3,5	0,7	0,07	63,8	2,4
4,5	0,72	0,09	67	2,1

En las Tablas 7 y 8 se muestran los valores obtenidos para cada parámetro medido según la tasa de carga orgánica utilizada.

A continuación, se muestra en la Tabla 9 los rangos de valores obtenidos para cada parámetro.

Tabla 9. Rango de valores obtenidos en el estudio para cada parámetro analizado.

Parámetro	Rango de valores
pH	7,3-7,4
Alcalinidad (gCaCO <sub>3</sub> /L)	0,4-6,7
Ratio ácidos volátiles grasos/alcalinidad	0,06-0,22
Cantidad nitrógeno amónico (g/L)	0,3-1,3

## Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

En la Figura 33 y en las Tablas 7, 8 y 9 se pueden observar todos los resultados obtenidos en el estudio. En primer lugar, el rango de valores obtenido para la alcalinidad demuestra que no hubo inhibición por acidificación.

Por otro lado, un ratio de ácido volátiles/alcalinidad inferior a 0,4 es adecuado para una digestión anaerobia viable y podría ser adecuado para evaluar la estabilidad del digestor. Por esta razón, puede confirmarse que el digestor con el que se trabaja puede considerarse estable.

Por último, el efecto inhibitorio aparece cuando la alcalinidad presenta una concentración superior a 6 g/L.

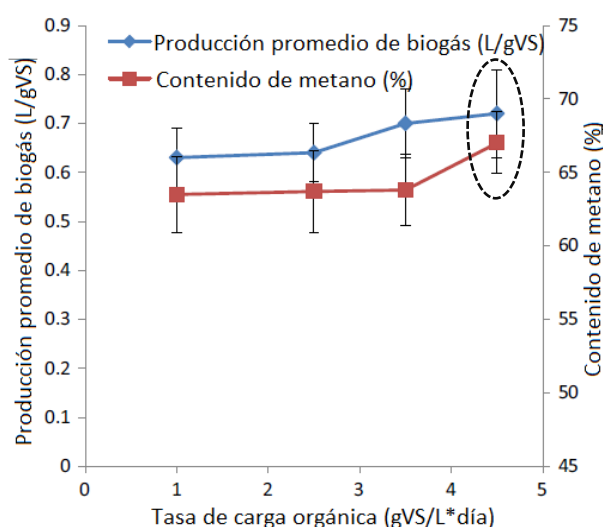


Figura 33. Producción promedio de biogás y porcentaje de metano obtenido durante el proceso de digestión anaerobia en un estado estable.

Respecto a la tasa de carga que se debería elegir para diseñar nuestra instalación se debe observar los valores presentados en las Tablas 7 y 8 y en la Figura 33.

Como puede observarse, se obtiene un incremento significativo de producción de biogás cuando la carga orgánica incrementa de 2,5 a 4,5 gSV/(L\*día), lo que indica la adaptación de los microorganismos a cargas mayores. Esto fomenta una mejor degradación de los sustratos y una producción de biogás más eficiente.

Sin embargo, no se presentó realmente una diferencia significativa en la producción de biogás entre las cargas de 3,5 y de 4,5 gSV/(L\*día), pero el contenido en metano en la carga de 4,5 gSV/(L\*día) es mayor que en la de 3,5. Esto sugiere que, independientemente del hecho de que los microorganismos metanogénicos estuvieron activos en las cargas de 3,5 y 4,5, los microorganismos productores de dióxido de carbono estuvieron más activos en la carga de 3,5 que de 4,5, lo que resultó en un menor contenido de metano.

Por otro lado, hubo un incremento en la concentración de sólidos totales y de sólidos volátiles mientras aumentaba la tasa de carga orgánica de 1 a 4,5 gSV/(L\*día), como puede apreciarse en la Tabla 7. Sin

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

embargo, una capacidad de eliminación eficiente de 75,2% para sólidos totales y de 78,3% para sólidos volátiles fue obtenida para una tasa de carga orgánica de 4,5, como se muestra en la Tabla 7 también. Además, prestando atención a la Figura 33, se observa que, tanto para la producción de biogás como para el contenido de metano, la carga óptima es la de 4,5.

Como se observa en la producción de biogás, entre la carga de 1 y de 2,5 se mantiene prácticamente constante. Para una carga de 3,5 aumenta pero para una de 4,5 vuelve a aumentar, lo que significa que el máximo valor de producción de biogás se obtiene para una carga de 4,5 con un valor de 0,72 L/gSV.

Por otro lado, observando el contenido en metano, para una carga de 1, de 2,5 y de 3,5 puede considerarse casi constante. Sin embargo, para una carga de 4,5 se experimenta un incremento de casi un 4%, por lo que es también la carga óptima.

A modo de conclusión, todo esto demuestra que la tasa de carga orgánica óptima para la codigestión anaerobia de residuo orgánico y residuo de maíz a una temperatura mesófila es de **4,5 gSV/(L\*día)**.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

### 5.3. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

Los residuos se recogerán manualmente y se cargarán camiones con éstos para su transporte a la instalación. Una vez en la instalación, se descargarán en una tolva trituradora. A continuación, mediante un tornillo sinfín serán transportados a la cámara de mezcla, donde serán mezclados con agua. Después de un día de tiempo de residencia en la cámara serán llevados al digestor anaerobio donde el tiempo de residencia será de 10 días. El biogás obtenido en la digestión anaerobia será introducido en un gasómetro donde será almacenado para introducirlo en una torre de desulfuración donde se eliminará el ácido sulfhídrico. Por último, será llevado a un motor de cogeneración en el cual se transformará el biogás en energía eléctrica.

A continuación, se procede a ubicar los equipos.

#### 5.3.1. Diseño del digestor

Para empezar, en el apartado 5.2. se ha llegado a una conclusión de que una tasa de carga orgánica de 4,5 gSV/(L\*día) es la óptima. Debido a que, tal y como se observa en la Figura 34, la producción de biogás se estabiliza y, ya que se trabaja con una cantidad diaria considerablemente grande, se ha decidido trabajar con una carga orgánica de 5 gSV/(L\*día).

Por tanto, la cantidad diaria disponible de residuos es de 200 toneladas/día. Así, aplicando una carga de un 0,005 toneladasSV/(m<sup>3</sup>\*día), se obtiene un volumen de digestor de 40.000 m<sup>3</sup>. Como se trata de un volumen muy grande, se ha decidido crear seis líneas, ya que es muy difícil trabajar con un digestor de dimensiones tan grandes. De esta forma, se necesitan seis digestores de 6.666,67 m<sup>3</sup>, aproximando a 7.000 m<sup>3</sup>. Así, suponiendo una altura de 10 m y aplicando la Ecuación 2:

$$\text{Ecuación 2} \quad V = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$

Siendo:

V: volumen del digestor (m<sup>3</sup>)

D: diámetro del digestor (m)

H: altura del digestor (m)

Se obtiene un diámetro de 29,8 m

Consultando catálogos de digestores, se ha encontrado la empresa TORO. En dicha empresa, se encuentra la gama de depósitos W-Tank. Así, se ha seleccionado el depósito con un volumen de 7.669 m<sup>3</sup>, con una altura de 11 m y un diámetro de 29,8 m, ya que es el que más se ajusta a nuestras condiciones.

A continuación, se muestra en la Tabla 10 un resumen de las dimensiones del digestor elegido.



Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

Tabla 10. Dimensiones del digestor.

<b>Diámetro (m)</b>	29,8
<b>Altura (m)</b>	11
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	7.669

### 5.3.2. Diseño de la cámara de mezcla

Previamente al digestor, será necesario colocar una cámara de mezcla donde homogeneizar la mezcla de residuo orgánico tratado y de residuo de maíz con agua.

Una vez conocido el volumen del digestor, se debe hallar el caudal de residuo y agua con el que se alimentará al digestor diariamente.

Partiendo de los 7.000 m<sup>3</sup> con los que se llenará el digestor, y teniendo en cuenta que el tiempo de residencia es de 10 días, se tratarán unos 700 m<sup>3</sup>/día y por línea, lo que son unos 20 m<sup>3</sup>/h. Por tanto, teniendo seis líneas y 700 m<sup>3</sup>/día en cada una de ellas, la cámara suministrará al digestor diariamente un caudal de unos 4.000 m<sup>3</sup>/día de fango.

Así, para su diseño, será necesario conocer el volumen de dicha cámara. Para ello, se tiene en cuenta la Ecuación 3.

$$\text{Ecuación 3} \quad V_{\text{cámara}} = Q_{\text{cámara}} * t_{\text{residencia}}$$

Tomando un tiempo de residencia de 1 día en la cámara se obtiene:

$$V_{\text{cámara}} = 4.000 \text{ m}^3$$

Así, conociendo el volumen del tanque y suponiendo una altura de 10 m, se aplica la Ecuación 2 para obtener un diámetro de 22,6 m.

Consultando el catálogo de la empresa TORO y su gama de W-Tank, se ha elegido el depósito con las siguientes dimensiones.

Tabla 11. Dimensiones de la cámara de mezcla.

<b>Diámetro (m)</b>	23,4
<b>Altura (m)</b>	10
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	4.305

Una vez conocido el volumen de la cámara de mezcla, debe seleccionarse un agitador para implementar en el depósito, ya que la agitación es necesaria para favorecer la homogeneización de la mezcla.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

Para ello, se ha consultado el catálogo de agitadores de la empresa Fluidmix y se ha seleccionado el agitador vertical **Serie VPS**.

### 5.3.3. Diseño del motor de cogeneración

En primer lugar, se debe calcular la cantidad de biogás y de metano producida al día. Partiendo de que se trabaja con una carga de 5 gMO/(L\*día), lo que serían 5 kgMO/(m<sup>3</sup>\*día) y que, tal y como se indica en la Tabla 8, se producen 0,72 L/gMO de biogás, lo que serían 0,72 m<sup>3</sup>/kgMO, se realiza el siguiente cálculo para una línea de la instalación:

$$5 \frac{kg MO}{m^3 fango} * 0,72 \frac{m^3 biogás}{kg MO} = 3,6 \frac{m^3 biogás}{m^3 fango * día}$$

Así, teniendo un caudal de alimentación de fango de 40.000 m<sup>3</sup>/10 días, siendo 4.000 m<sup>3</sup>/día:

$$3,6 \frac{m^3 biogás}{m^3 fango * día} * 4.000 m^3 fango = 14.400 \frac{Nm^3 biogás}{día} = 600 \frac{Nm^3 biogás}{hora}$$

Sabiendo que un 67% de metano se encuentra en el biogás, se obtiene:

$$600 \frac{Nm^3 biogás}{hora} * 0,67 = 402 \frac{Nm^3 metano}{hora}$$

Así, se ha elegido el motor de cogeneración **Senergie G 9408**, del modelo G 9408 TIE de la empresa Altare. Este motor admite un consumo de 77,8 m<sup>3</sup>/h de metano. Por tanto, harán falta cinco motores como este.

En la instalación se obtienen 402 m<sup>3</sup>/h de metano, de los cuales 389 m<sup>3</sup>/h son introducidos en el motor. Por tanto, los 13 m<sup>3</sup>/h de metano restantes deberán ser llevados a la antorcha, lo que son 19,4 m<sup>3</sup>/h de biogás.

### 5.3.4. Diseño de la antorcha

Ahora, para el diseño de la antorcha, será necesario conocer la cantidad de biogás que debe ir a la antorcha con el fin de quemarlo y que no suponga un impacto para el medioambiente. Este será el caudal de biogás que no sea introducido en el gasómetro.

Como se ha calculado anteriormente, 13 m<sup>3</sup>/h de metano son llevados a la antorcha, lo que son 19,4 m<sup>3</sup>/h de biogás.

A continuación, se debe buscar un catálogo de antorchas para elegir la que mejor se ajuste a las condiciones anteriormente descritas.

Debido a que es posible que la instalación se encuentre en una zona residencial, se ha preferido una antorcha para combustión cerrada. De esta forma, se podrá observar el vapor que sale de la antorcha

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

pero no la llama. Así, se ha elegido la antorcha **IFL1c60**, del fabricante HOFSTETTER, que admite un caudal de biogás de 60 Nm<sup>3</sup>/h.

### 5.3.5. Diseño de la torre de desulfuración del biogás

Primero, se debe conocer qué cantidad de ácido sulfhídrico se produce en la instalación. Tal y como se indica en el apartado 5.1. de la parte de la introducción, el biogás que se utiliza con fines energéticos está compuesto por un 0,1% de ácido sulfhídrico, aproximadamente. Por tanto, teniendo un caudal de 580,6 Nm<sup>3</sup>/h de biogás, se obtendrá un caudal de 0,58 Nm<sup>3</sup>/h de ácido sulfhídrico.

Así, se ha elegido la torre de desulfuración **CGSB-A**, de la compañía DMT-BioSulfurex. Esta torre admite hasta un caudal de 250 Nm<sup>3</sup>/h. A continuación, se muestran las dimensiones de dicha torre.

Tabla 12. Dimensiones de la torre de desulfuración.

<b>Diámetro (m)</b>	1,5
<b>Altura (m)</b>	5

### 5.3.6. Diseño del gasómetro.

Para diseñar el gasómetro de la instalación, primero se debe calcular su volumen. Para ello, se aplicará la Ecuación 4.

$$\text{Ecuación 4} \quad V_{\text{gasómetro}} = Q_{\text{cogeneración}} * t_{\text{residencia}}$$

Así, el  $Q_{\text{cogeneración}}$  ya ha sido calculado anteriormente, dando un valor de 580,6 Nm<sup>3</sup>/h de biogás. Por otro lado, el tiempo de residencia será de 1 día en el gasómetro, lo que son 24 horas. Por tanto:

$$V_{\text{gasómetro}} = 580,6 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{h}} * 24 \text{ h} = 13.934,4 \text{ Nm}^3 \text{ biogás}$$

Dado que el volumen obtenido es considerablemente grande, se van a necesitar tres gasómetros de 4.645 m<sup>3</sup>. Consultando el catálogo de Sattler y comparando nuestras condiciones, se ha elegido el gasómetro **B9 129/250**, necesiándose tres de éstos para cubrir todo el volumen de biogás. A continuación, en la Tabla 13, se recogen las dimensiones de éste.

Tabla 13. Dimensiones del gasómetro.

<b>Diámetro (m)</b>	22,8
<b>Altura (m)</b>	17,1
<b>Capacidad efectiva (m<sup>3</sup>)</b>	4.950

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

A continuación, en la Tabla 14, se va a mostrar un resumen de los resultados obtenidos después de ubicar cada uno de los equipos necesarios en la instalación.

Tabla 14. Resultados obtenidos del diseño de cada equipo de la instalación.

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Q<sub>biogás</sub> (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Q<sub>metano</sub> (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Q<sub>sulfhídrico</sub> (m<sup>3</sup>/h)</b>
<b>Digestor</b>	6	7.000	-	-	-
<b>Cámara de mezcla</b>	1	4.000	-	-	-
<b>Motor de cogeneración</b>	5	-	580,6	389	-
<b>Antorcha</b>	1	-	19,4	13	-
<b>Torre de desulfuración</b>	1	-	-	-	0,58
<b>Gasómetro</b>	3	4.645	-	-	-

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

#### 5.4. DIAGRAMA DE FLUJO Y DE BLOQUES DE LA INSTALACIÓN

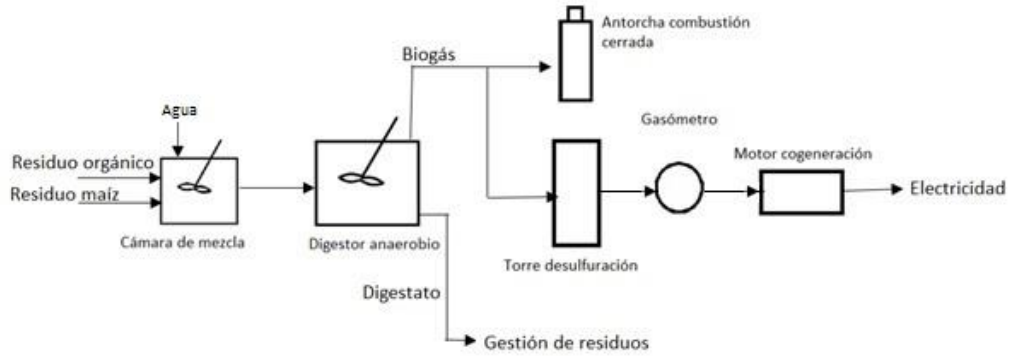


Figura 34. Diagrama de flujo de la instalación.

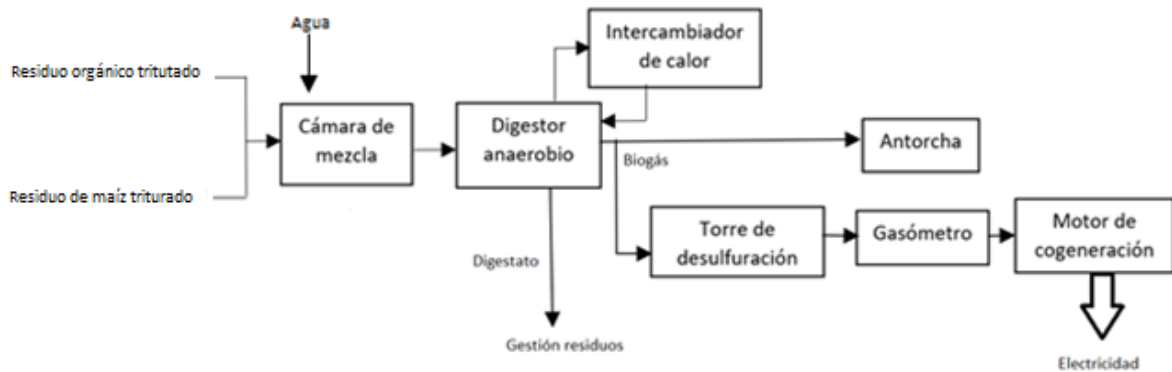


Figura 35. Diagrama de bloques de la instalación.

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

## 5.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Suponiendo que todo el biogás producido es aprovechado y nada es quemado, y teniendo en cuenta que 1 Nm<sup>3</sup> de biogás equivale a 6,8 kW, se obtendría, para toda la instalación:

$$14.400 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 600 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{h}} * 6,8 \frac{\text{kW}}{\text{Nm}^3 \text{ biogás}} = 4.080 \frac{\text{kW}}{\text{h}} = 97.920 \frac{\text{kW}}{\text{día}}$$

Dado que una proporción debe llevarse a la antorcha y sólo se aprovechan 401,2 Nm<sup>3</sup>/h de biogás, se obtiene:

$$580,6 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{h}} * 6,8 \frac{\text{kW}}{\text{Nm}^3 \text{ biogás}} = 3.948 \frac{\text{kW}}{\text{h}} = 94.753,9 \frac{\text{kW}}{\text{día}}$$

También podría hacerse este cálculo usando el poder calorífico interno del metano (PCI), siendo éste de 9,96  $\frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3}$ . Para obtener el PCI del biogás se debe usar el porcentaje de contenido de metano presente en biogás, siendo éste de un 67% como se indica en la Tabla 8.

$$PCI_{\text{biogás}} = 9,96 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} * 0,67 = 6,67 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3}$$

Así, aplicando la Ecuación 5,

$$\text{Ecuación 5} \quad \text{Energía eléctrica} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{día}} \right) = PCI_{\text{biogás}} * Q_{\text{biogás}}$$

Se obtiene:

$$\text{Energía eléctrica} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{día}} \right) = 6,67 \left( \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} \right) * 580,6 \left( \frac{\text{Nm}^3}{\text{hora}} \right) = 3.872,6 \frac{\text{kWh}}{\text{hora}} = 92.942,5 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$$

Debido a que se han obtenido resultados diferentes pero muy similares, se va a coger un dato intermedio entre ambos, siendo este de 93.848,2 kWh/día. Debido a que el motor de cogeneración presenta un rendimiento global de un 91%, la energía eléctrica producida diariamente será de **85.401,84 kWh/día**.

Según la referencia [27], el precio de la electricidad en Tanzania es de 0,09 €/kWh. Por tanto, conseguir una energía eléctrica en Tanzania de 85.401,84 kWh/día tiene un coste de 7.686,17 €/día, lo que equivale a 2.805.450,4 €/año.

Tal y como se indica en la referencia [27], el consumo de electricidad por cápita en Tanzania es de aproximadamente 92 kWh/año, lo que equivale a 0,25 kWh/día.

Teniendo en cuenta la ciudad de Arusha presenta una población de 507.903 habitantes, el consumo diario promedio debería ser de 126.975,75 kWh/día. Por tanto, obteniendo 85.401,84 kWh/día, podría abastecerse a 341.607,4 habitantes al día.

Así como se indica en la referencia [29], cada núcleo familiar está compuesto por una media de 4,8 personas. Teniendo en cuenta la población de la ciudad, habría alrededor de 105.813,13 núcleos familiares en Arusha. Además, así como lo recoge la referencia [30], sólo aproximadamente un 16,1%

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

de los núcleos familiares tienen acceso a electricidad en la actualidad, lo que supone que sólo 17.035,91 núcleos familiares tienen acceso a ésta actualmente. Después de la instalación, 341.607,4 habitantes más tendrían acceso a electricidad, lo que son unos 71.168,2 núcleos familiares. Suponiendo que el 16,1% previo a la instalación sigue siendo abastecido de la misma forma, 88.204,11 núcleos familiares tendrán acceso a la electricidad una vez implementada la instalación.

De esta forma, con la instalación diseñada, el 83,36% de los núcleos familiares tienen acceso a energía eléctrica, por lo que se ha aumentado en un 67,26%.

Tabla 15. Núcleos familiares con acceso a energía eléctrica antes y después de implementar la instalación.

	<b>Número de núcleos familiares</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Antes de la instalación</b>	17.035,91	16,1%
<b>Después de la instalación</b>	88.204,11	83,36%

Comparando los resultados presentados en la Tabla 15, se puede observar que, después de implementar la instalación, se ha aumentado en un 83,36% la cantidad de núcleos familiares abastecidos con energía eléctrica. Por tanto, se puede afirmar que la instalación resulta útil y rentable porque se aumenta el acceso a energía eléctrica por parte de los habitantes de la ciudad, aunque no es suficiente para abastecer a la ciudad en su totalidad, como cabía esperar.

Debido a que sólo se utilizan 7.000 m<sup>3</sup>/día de fango de los 40.000 m<sup>3</sup>/día producidos, el restante debería almacenarse con el fin de tenerlos supervisados y de que no supongan un impacto medioambiental. Además, como bien se observa en las Figuras 12 y 13, el cultivo de maíz en Arusha tiende a experimentar constantes subidas y bajadas. De esta forma, en caso de encontrarse en una estación de baja producción de maíz, se podría recurrir al fango almacenado para mantener la producción de energía. Por otro lado, debido a las políticas medioambientales del país para la concienciación sobre la contaminación, cabe esperar la disminución de la producción de residuos en la ciudad. Por último, el fango sobrante podría destinarse a la implementación de una nueva instalación con características similares. De esta forma, podría abastecerse a la totalidad de la población, así como abastecer también a ese 16,1% con este método que no supone un impacto medioambiental.

### **5.5.1. Inconvenientes**

Los inconvenientes que presenta la ejecución de esta instalación están relacionados especialmente con el factor humano. Esto es debido a la necesidad de concienciación y de educación por parte de los habitantes acerca del papel que toma la instalación en su día a día, ya que se reduce el impacto medioambiental a la vez que se mejora la calidad de vida de los habitantes. Además, es necesaria una educación tanto para la recogida selectiva de residuos como para la adecuada utilización de los equipos y su mantenimiento.





## **6. CONCLUSIONES**

En primer lugar, realizando el análisis de la realidad de la ciudad de Arusha, puede confirmarse la necesidad de implementar el presente proyecto con el fin de, por un lado, reducir la cantidad de residuos generados así como el impacto medioambiental y, por otro lado, de asegurar el acceso de energía eléctrica a los núcleos familiares de forma segura. Además, se cumpliría con el objetivo número 7: “Energía asequible y no contaminante”, planteado por el plan de acción Horizonte 2030.

Con respecto a los sustratos utilizados para la generación de biogás son residuos orgánicos y residuos de maíz, ambos sustratos son de fácil obtención debido a la elevada producción de ambos en la región de Arusha. En relación a los residuos de maíz, gran parte de la economía del país depende de la agricultura, siendo el maíz el producto mayor producido. Así, se aprovechan sus residuos a la vez que sigue siendo utilizado como base alimenticia del país.

Por otro lado, en relación a la instalación diseñada, compuesta por una cámara de mezcla, un digestor anaerobio, un gasómetro, una torre de desulfuración, una antorcha y un motor de cogeneración, resulta adecuada para la persecución de los objetivos planteados.

Además, con relación a los resultados obtenidos, la instalación cumple con los objetivos planteados de reducción de residuos y de abastecimiento de energía eléctrica. Respecto a este último, no se ha alcanzado a abastecer a la totalidad de la población, tal y como se esperaba. Sin embargo, se ha conseguido aumentar de un 16,1% a un 83,36% la cantidad de habitantes con acceso a energía eléctrica. Por tanto, se podría considerar que el presente proyecto resulta de gran utilidad para la ciudad y se consiguen los objetivos planteados. Por otro lado, el fango sobrante no utilizado en la presente instalación podría ser utilizado para la implementación de una segunda instalación de características similares con el fin de abastecer a la totalidad de la población.

Por último, aparecen inconvenientes relacionados con el factor humano mayoritariamente por la falta de educación y de concienciación acerca de la finalidad de la instalación, lo que puede llevar a un mal uso de ésta por parte de los habitantes.



## **7. BIBLIOGRAFÍA**

- [1] <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/> (Consulta: 6 de febrero de 2019)
- [2] [http://www.fao.org/ag/agn/nutrition/tza\\_es.stm](http://www.fao.org/ag/agn/nutrition/tza_es.stm) (Consulta: 6 de febrero de 2019)
- [3] [https://livestocklivelihoodsandhealth.org/wp-content/uploads/2015/07/Tanzania\\_Livestock\\_Modernization\\_Initiative\\_July\\_2015.pdf](https://livestocklivelihoodsandhealth.org/wp-content/uploads/2015/07/Tanzania_Livestock_Modernization_Initiative_July_2015.pdf) (Consulta: 6 de febrero de 2019)
- [4] <http://dataforall.org/dashboard/tanzania/> (Consulta: 7 de febrero de 2019)
- [5] [https://www.researchgate.net/publication/228774800\\_Environmental\\_Law\\_in\\_Tanzania\\_How\\_Far\\_Have\\_We\\_Gone](https://www.researchgate.net/publication/228774800_Environmental_Law_in_Tanzania_How_Far_Have_We_Gone) (Consulta: 8 de febrero de 2019)
- [6] [http://www.minigrids.go.tz/Files/The\\_National\\_Environmental\\_Policy\\_1997.pdf](http://www.minigrids.go.tz/Files/The_National_Environmental_Policy_1997.pdf) (Consulta: 8 de febrero de 2019)
- [7] [https://www.unpei.org/sites/default/files/e\\_library\\_documents/TZ-Environment-heart-of-dev.pdf](https://www.unpei.org/sites/default/files/e_library_documents/TZ-Environment-heart-of-dev.pdf) (Consulta: 8 de febrero de 2019)
- [8] <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/tan71740a.pdf> (Consulta: 8 de febrero de 2019)
- [9] [https://thereddesk.org/sites/default/files/mkukuta\\_i\\_2005.pdf](https://thereddesk.org/sites/default/files/mkukuta_i_2005.pdf) (Consulta: 9 de febrero de 2019)
- [10] [https://thereddesk.org/sites/default/files/mkukuta\\_ii.pdf](https://thereddesk.org/sites/default/files/mkukuta_ii.pdf) (Consulta: 9 de febrero de 2019)
- [11] <http://www.esrftz.org/PEI/pdf/NCS.pdf> (Consulta: 9 de febrero de 2019)
- [12] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/> (Consulta: 9 de febrero 2019)
- [13] <https://www.gob.mx/inafed/articulos/que-es-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible> (Consulta: 9 de febrero de 2019)
- [14] <http://www.pasturasdeamerica.com/utilizacion-forrajes/residuos-agricolas/maiz/> (Consulta: 12 de febrero de 2019)
- [15] <http://www.matchmakergroup.com/news/maize-sector-in-tanzania-challenges-and-opportunities.aspx#.XGGil1xKg2w> (Consulta: 12 de febrero de 2019)
- [16] <https://knoema.es/atlas/Rep%C3%BAblica-Unida-de-Tanzania/topics/Agricultura/Producci%C3%B3n-de-Cultivos-Cantidad-toneladas/Ma%C3%ADz> (Consulta: 12 de febrero de 2019)
- [17] <http://dataforall.org/tanzania/libraries/asp/Home.aspx> (Consulta: 12 de febrero de 2019)
- [18] <https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/biomasa-digestores-anaerobios> (Consulta: 14 de febrero de 2019)
- [19] <https://www.aboutespanol.com/que-es-un-biodigestor-3417683> (Consulta: 14 de febrero de 2019)
- [20] [http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/4243/mod\\_resource/content/0/TesisCompletaTAR.pdf](http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/4243/mod_resource/content/0/TesisCompletaTAR.pdf) (Consulta: 7 de junio de 2019)

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

- [21] <https://www.aboutspanol.com/que-es-el-biogas-3417682> (Consulta: 29 de mayo de 2019)
- [22] <http://www.biodisol.com/que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas/digestion-anaerobia-proceso-de-produccion-de-biogas-biocombustibles-energias-renovables/> (Consulta: 29 de mayo de 2019)
- [23] <http://www.plantasdecogeneracion.com/index.php/las-plantas-de-cogeneracion> (Consulta: 27 de junio de 2019)
- [24] <http://www.altare-energia.com/index.php> (Consulta: 27 de junio de 2019)
- [25] <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-basica-de-Microcogeneracion-fenercom-2012.pdf> (Consulta: 27 de junio de 2019)
- [26] <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-la-Cogeneracion-fenercom-2010.pdf> (Consulta: 27 de junio de 2019)
- [27] [https://www.globalpetrolprices.com/Tanzania/electricity\\_prices/](https://www.globalpetrolprices.com/Tanzania/electricity_prices/) (Consulta: 3 de junio de 2019)
- [28] <https://www.indexmundi.com/map/?t=0&v=81000&r=af&l=es> (Consulta: 3 de junio de 2019)
- [29] <https://dhsprogram.com/pubs/pdf/FR173/02Chapter02.pdf> (Consulta: 3 de junio de 2019)
- [30] <http://tanzania.opendataforafrica.org/TZSOECD2016/social-economics-of-tanzania-2016?region=1000030-arusha&indicator=1005090-households-using-electricity-as-their-main-sources-of-energy-for-lighting-percent> (Consulta: 3 de junio de 2019)

### 7.1. Referencias para el diseño

- 1- <http://pdf.directindustry.es/pdf/toro-equipment/depositos-decantadores-w-tank/102939-555067-2.html> (Consulta: 31 de mayo de 2019)
- 2- [http://www.mspesp.com/equipos\\_biogas.html](http://www.mspesp.com/equipos_biogas.html) (Consulta: 31 de mayo de 2019)
- 3- <http://www.altare-energia.com/> (Consulta: 31 de mayo de 2019)
- 4- <http://pdf.directindustry.es/pdf/dmt-environmental-technology/dmt-biosulfurex-desulfurizacion-bio-gas/90057-296159.html> (Consulta: 1 de junio de 2019)
- 5- <https://www.sattler-global.com/biogas/es/index.jsp> (Consulta: 1 de junio de 2019)
- 6- Trabajo Fin de Grado de Daniela Lo Guzzo:  
[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/87867/X7406133H\\_TFG\\_14993580970604451320077220567788.pdf?sequence=2](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/87867/X7406133H_TFG_14993580970604451320077220567788.pdf?sequence=2) (Consulta: 3 de junio de 2019)
- 7- Libro "Tratamiento de fangos de depuración de aguas residuales" por José Antonio Mendoza Roca y por Amparo Bes Plá. (Consulta: 29 de mayo de 2019)

### 7.2. Referencias para el presupuesto

- 1- Apuntes de la asignatura "Proyectos en Ingeniería Química" (Consulta: 5 de junio de 2019)

# **DOCUMENTO II:**

# **PRESUPUESTO**



Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

A lo largo de este capítulo, se va a mostrar el presupuesto necesario para implementar el presente proyecto.

Tabla 16. Presupuesto de la línea de fangos.

<b>CÓDIGO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO (€)</b>	<b>IMPORTE (€)</b>
LF.1	CÁMARA DE MEZCLA: Tanque de hormigón de planta circular. Consta sistema de agitación, toma-muestra y aliviadero.	1	10.000	10.000
LF.2	DIGESTOR ANAEROBIO: Tanque de hormigón, con sistema de agitación, toma muestra, rebose.	6	20.000	120.000
LF.3	Intercambiador de calor	1	1.000	1.000
LF.4	Agitador vertical	1	3.000	3.000
LF.5	Válvula de control de flujo	9	75	675
LF.6	Caudalímetro	4	250	1.000
LF.7	Medidor de temperatura	1	70	70
LF.8	Medidor de nivel	2	96	192
LF.9	Conductímetro	1	154	154
LF.10	pH-metro	2	170	340
LF.11	Supresor de gas	3	2.000	6.000
<b>TOTAL</b>				<b>142.431</b>

Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

Tabla 17. Presupuesto de la línea de biogás.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)	IMPORTE (€)
LB.1	<b>GASÓMETRO:</b> Gasómetro de doble membrana de SATTLER compuesto por una membrana, así como por una membrana interior y una membrana de fondo. Capacidad máxima de 4560 m <sup>3</sup> .	3	270.000	810.000
LB.2	<b>ANTORCHA:</b> Antorcha para operación con gasómetro de combustión cerrada. Caudal máximo de 60 m <sup>3</sup> /h.	1	3.200	3.200
LB.3	<b>TORRE DE DESULFURACIÓN:</b> Torre de desulfuración de la marca BioSulfurex. Caudal máximo de 250 m <sup>3</sup> /h.	1	70.000	70.000
LB.4	<b>MOTOR DE COGENERACIÓN:</b> Motor de cogeneración Senergie G9 408 de la empresa Altare	5	100.000	500.000
LB.5	Válvula de control de flujo	5	75	375
LB.6	Supresor de gas	1	2.000	2.000
LB.7	Válvula de seguridad	3	450	1.350
LB.8	Caudalímetro	4	250	1.000
<b>TOTAL</b>				1.387.925

Tabla 18. Presupuesto de la mano de obra.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (h)	PRECIO	IMPORTE
MO.1	Ingeniero químico	960	20	19.200
MO.2	Peón ordinario	960	10	9.600
<b>TOTAL</b>				28.800



Diseño de una instalación para la obtención de energía a partir de residuos orgánicos en la región de Arusha (Tanzania).

Tabla 19. Presupuesto de ejecución material (PEM).

<b>CÓDIGO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>IMPORTE (€)</b>
LF	Línea de fangos	142.431
LB	Línea de biogás	1.387.925
MO	Mano de obra	28.800
SUBTOTAL		1.559.156
15% Gastos Generales		233.873,4
6% Beneficio Industrial		93.549,4
<b>TOTAL</b>		<b>1.886.578,8</b>

Tabla 20. Presupuesto de ejecución por contrata (PEC).

<b>CÓDIGO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>IMPORTE (€)</b>
PEM	Presupuesto ejecución material	1.886.578,8
21% I.V.A.		394.024,03
<b>Presupuesto de Inversión</b>		<b>2.282.760,3</b>

El presupuesto necesario para la implementación del presente proyecto asciende a **DOS MILLONES DOS CIENTOS OCHENTA Y DOS MIL SETECIENTOS SESENTA EUROS CON TREINTA CÉNTIMOS DE EURO.**

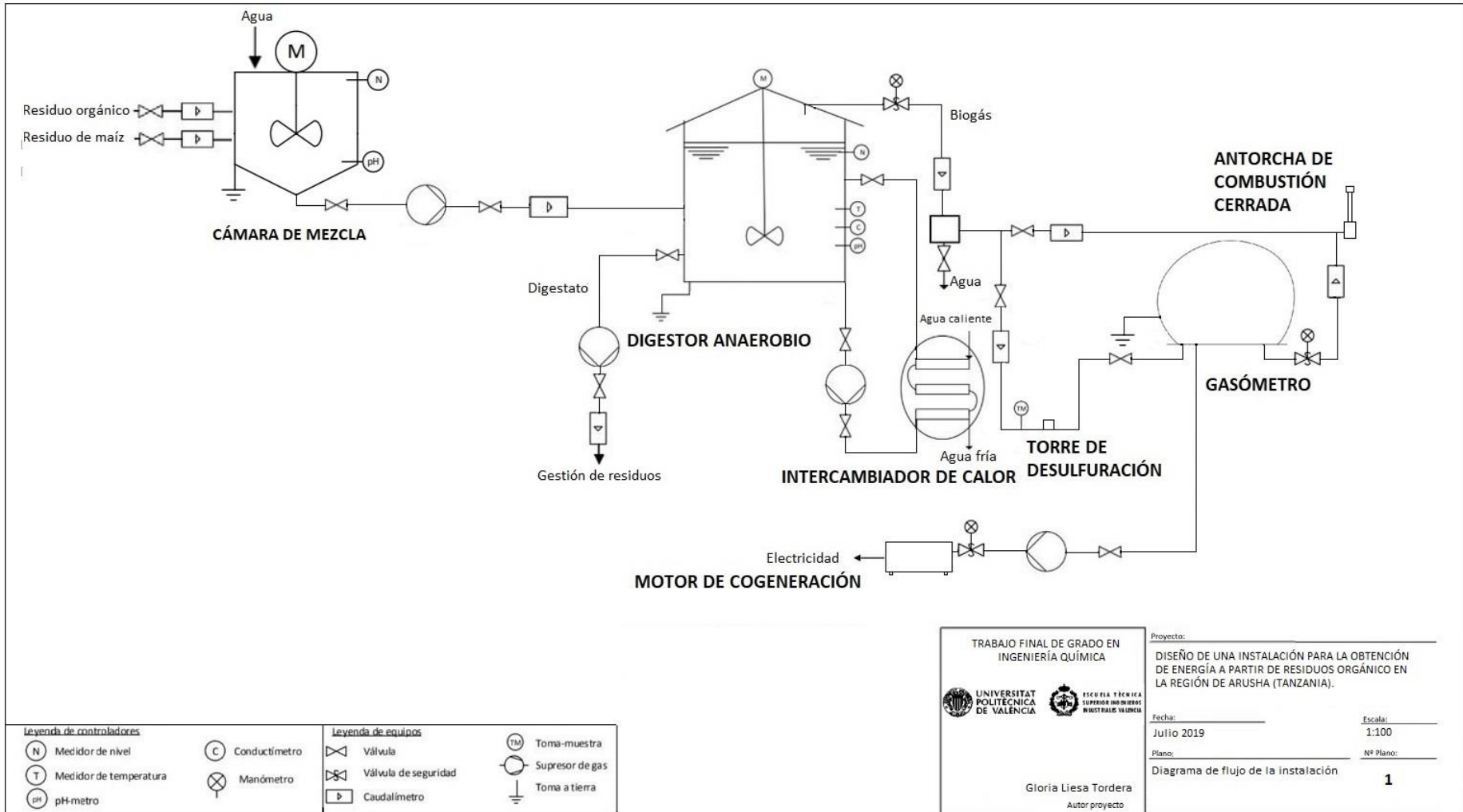
Este presupuesto podría estar financiado parcialmente por ayudas benéficas dado que se trata de un proyecto sin ánimo de lucro y por subvenciones públicas.



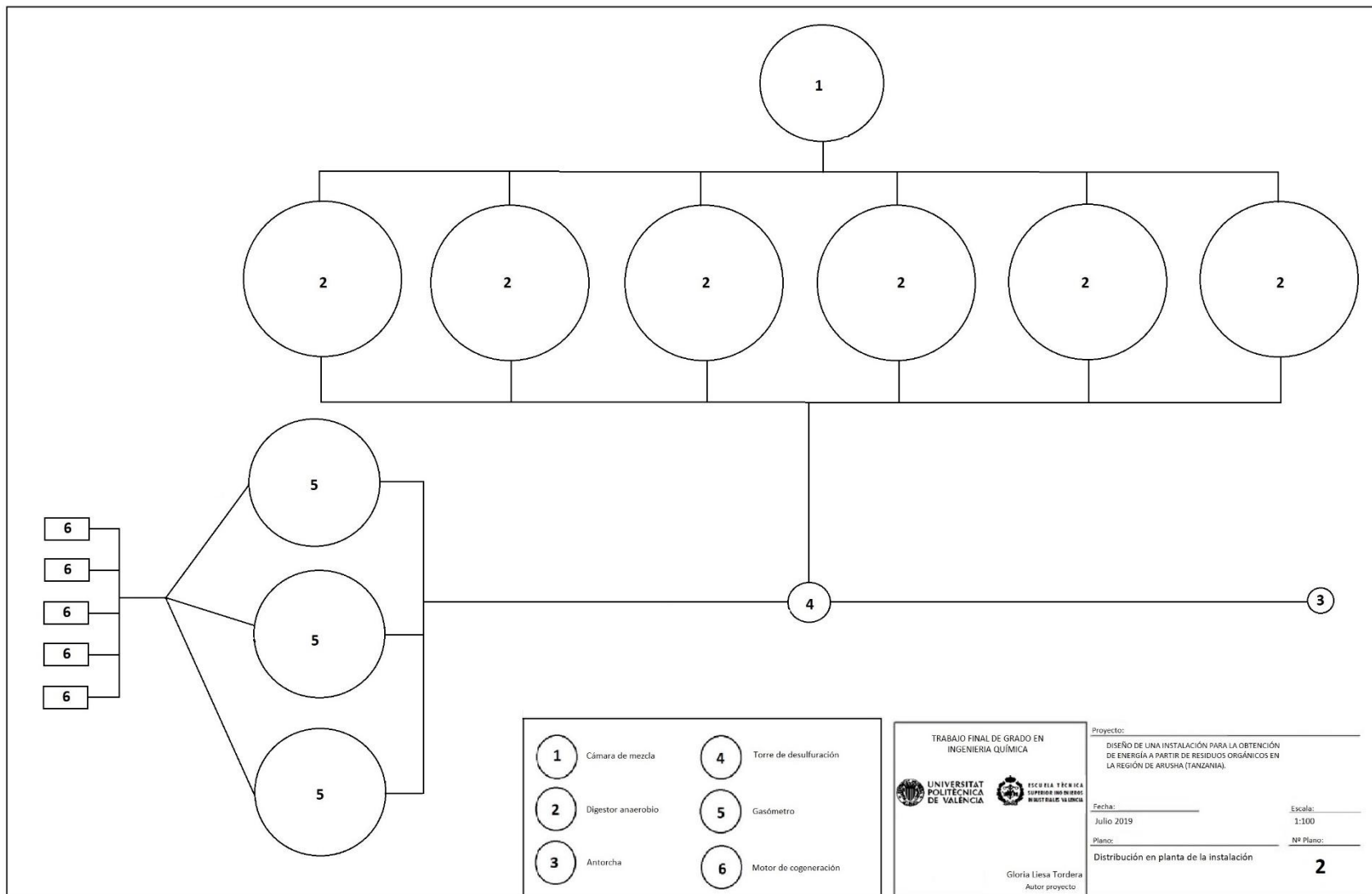
# **DOCUMENTO III:**

# **PLANOS**













# **DOCUMENTO IV:**

## **ANEXOS**



## **Anexo I:**

**Especificaciones técnicas de los equipos seleccionados para la instalación.**





## AGITADORES VERTICALES



### Serie VPS

- Para depósitos grandes.
- Diseño polivalente en diversas aplicaciones.
- Velocidades de 30 a 150 rpm.
- Motores de 3,7 a 90 kW.
- Hélice axial tripala de perfil tipo "S".
- Diámetro de hélice de 800 a 6000 mm.
- Longitud máxima de eje 15000 mm.
- Reductor de ejes paralelos, de engranaje cónico o coaxial de engranajes helicoidales.



### Serie VPA

- Para depósitos tipo "tacho".
- Diseño especial para proceso de cristalización de azúcar.
- Velocidades de 30 a 125 rpm.
- Motores de 30 a 125 kW.
- Hélice axial tripala de perfil tipo "S", con dedos de turbulencia.
- Diámetro de hélice de 800 a 3000 mm.
- Longitud máxima de eje 12000 mm.
- Reductor de ejes paralelos, de engranaje cónico o sistema de poleas y correas.



### Serie VFT

- Para depósitos grandes.
- Agitador muy lento especial para floculación.
- Velocidad de 5 a 50 rpm.
- Motores de 0,75 a 7,5 kW.
- 2/3 palas axiales de perfil tipo "F".
- Diámetro de hélice de 400 a 4000 mm.
- Longitud máxima de eje 12000 mm.
- Reductor de ejes paralelos, de engranaje cónico o coaxial de engranajes helicoidales.



### Series VFR y VFV

- Para depósitos grandes.
- Agitador muy lento especial para floculación.
- Velocidad de 5 a 50 rpm (VFR, velocidad fija; VFV, velocidad variable).
- Motores de 0,75 a 7,5 kW.
- Perfil alabeado axial tripala tipo "S".
- Diámetro de hélice de 400 a 4000 mm.
- Longitud máxima de eje 12000 mm.
- Reductor de ejes paralelos, de engranaje cónico o coaxial de engranajes helicoidales.



Texto...  Busc...

[Inicio](#) [Microcogeneración](#) [Minicogeneración](#) [Biogás](#) [EXEON](#) [COGENpack](#) [Inst. Aisladas](#) [Empresa](#) [S.A.T.](#)



## Minicogeneración

[Minicogeneración](#) | [Aplicaciones](#) | [Referencias](#) | [Senergie](#)

ALTARE ofrece una amplia gama de equipos compactos de minicogeneración Senergie para uso en edificios con gran consumo térmico e industrias de mediano tamaño. Completamente integrados y listos para conectar y operar, alcanzan rendimientos eléctricos de hasta el 39% y eficiencias globales cercanas al 90%, permitiendo ahorros energéticos de hasta 3 GWh/año.

Nuestros equipos emplean robustos motores industriales para uso intensivo operando con mezcla pobre, turbocompresor e intercambiadores. Su funcionamiento es gestionado mediante la tecnología Senertronik, que monitoriza en todo momento las temperaturas en cada una de las cámaras de combustión y optimiza la formación de la mezcla y el encendido en tiempo real.



### Ventajas

- Motores industriales Heavy-Duty MWM International y LIEBHERR.
- Sistema Senertronik de gestión integral de la combustión.
- Máximo rendimiento eléctrico con fiabilidad y robustez garantizadas.
- Recuperación de calor integrada. Eficiencia global superior al 88%.
- Cabinado compacto insonorizado con máxima accesibilidad mecánica.
- Mínimas emisiones: mediante el uso de catalizadores y EGR (LowNOx, opcional).
- Control industrial mediante PLC Siemens S7 con pantalla táctil y acceso remoto.
- Mínimos costes de mantenimiento.
- Para operación con gas natural, propano y biogás de diversos orígenes.
- También disponibles sin cabinar o montados en contenedor.

Como complemento a su oferta de equipos Senergie, ALTARE pone a su servicio:

- Una oficina técnica de soporte con más de ocho años de experiencia en el desarrollo de proyectos de cogeneración en España.
- Un servicio técnico propio con formación intensiva que actualmente mantiene más de 60 equipos en todo el territorio nacional.
- Nuestros exclusivos sistemas de supervisión remota EXEON Coger, diseñados para optimizar la operación de instalaciones de cogeneración.

Conozca nuestra gama de equipos ALTARE Senergie:

Equipo	Senergie 4.12	Senergie 6.12	Senergie 926	Senergie 9408
Variante	TI   S	TI   TE	T   TI   TIE	T   TI   TIE
Motor	MWM 4.12 4.81	MWM 6.12 7.21	LIEBHERR 926 10.01	LIEBHERR 9408 17.21
Potencia eléctrica [kW]	50   50	80   100	105   125   180	200   250   300
Potencia térmica [kW]	78   93	123   131	156   180   237	294   357   392
Consumo de gas [kW]	144   155	230   279	293   341   477	553   679   790
Rendimiento elect. [%]	34,7%   32,3%	34,8%   35,8%	35,8%   36,7%   37,7%	36,2%   36,8%   38,0%
Rendimiento térm. [%]	54,2%   60,0%	53,5%   47,0%	53,2%   52,2%   49,6%	53,1%   52,6%   49,6%
Rendimiento total [%]	88,9%   92,3%	88,3%   82,8%	89,1%   88,9%   87,3%	89,3%   89,4%   87,6%
Dimensiones [cm]	244x90x176	284x100x200	345x100x215	375x140x223
Peso [kg]	1.800	2.700	3.250-3.500	5.400-5.700
Nivel de emisiones	CO<sup>3</sup><sup>3</sup><sup>3</sup>: NOx<sup>3</sup><sup>3</sup><sup>3</sup>: NOx<sup>3</sup><sup>3</sup><sup>3</sup>: consultar versiones EGR ultra low NOx			
Sonoridad [dB(A) a 1m]	65	65	70	70
Descargar ficha técnica:				

>> Si es usted un profesional del sector solicite acceso al área técnica de nuestra web. En ella encontrará toda documentación técnica sobre nuestros productos e información de interés para el diseño y ejecución de proyectos de cogeneración.

### Información en formato PDF

- Altare :: Catálogo soluciones
- Altare :: Generación eficiente
- Altare :: Cogeneración en EDAR
- Gama Senergie gas natural
- Gama Senergie biogás
- Altare :: Microcogeneración
- Gama microcogeneración Smartblo
- Supervisión y control EXEON

Nombre de usuario

Contraseña

ALTARE trabaja con:



Instituto Tecnológico Hotelero



**Senergie G 9408**
**de 200 a 300 kWe**


Modelo	Motor: LIEBHERR V8	Potencia eléctrica	Rendimiento eléctrico	Potencia térmica	Rendimiento térmico	Consumo	Rendimiento global
<b>G 9408 T</b>	Mezcla pobre, Cat. Oxida, Turboalimentado	200 kW	36,1%	294 kW	53,2%	553 kW 54,8 m <sup>3</sup> /h*	89,3%
<b>G 9408 TI</b>	Mezcla pobre, Cat. Oxida, Turbo-intercooler	250 kW	36,8%	357 kW	52,6%	679 kW 67,2 m <sup>3</sup> /h*	89,4%
<b>G 9408 TIE</b>	Mezcla pobre, Cat. Oxida, Turbo con doble intercooler (interno-externo)	<b>300 kW</b>	<b>38,2%</b>	<b>416 kW</b>	<b>52,9%</b>	<b>786 kW 77,8 m<sup>3</sup>/h*</b>	<b>91,0%</b>

 Potencia según ISO 3046-1/EN 6271 a cos phi=1  
 Generador síncrono refrigerado por aire

 \*Gas Natural PCI 10,10 kWh/m<sup>3</sup>

Puede operar con biogás de distintos orígenes

**Dimensiones**

Largo	3.750 mm
Ancho	1.400 mm
Alto	2.230 mm
Peso	5.400-5.700 kg

**Emisiones**

TA-Luft	NOx < 500 mg/Nm <sup>3</sup> @ O <sub>2</sub> = 5 % CO < 300 mg/Nm <sup>3</sup> @ O <sub>2</sub> = 5 %
---------	---

**Datos adicionales:**

Cilindrada	17,2 litros
Nivel sonoro a 1 m	70 dB(A)
Presión de alimentación de gas	20 - 50 mbar
Temperaturas imp/ret	85 / 70 °C
Rpm	1.500 r/min
Tensión	3 x 400 V / 50Hz

**Control**

 PLC de control Siemens S7-300 montado en armario sobre el frontal del módulo  
 Interfaz de usuario en castellano mediante pantalla táctil de 5,7"

**Funciones:**

- Operación automática en paralelo con la red eléctrica.
- Regulación por demanda térmica con modulación de carga
- Supervisión local y remota con almacén de datos
- Envío instantáneo de alarmas.

**Mantenimiento**

Intervalo de mantenimiento	1.500-1.250-1.250 h (T-TI-TIE)
Overhaul	60.000-50.000-40.000 h (T-TI-TIE)

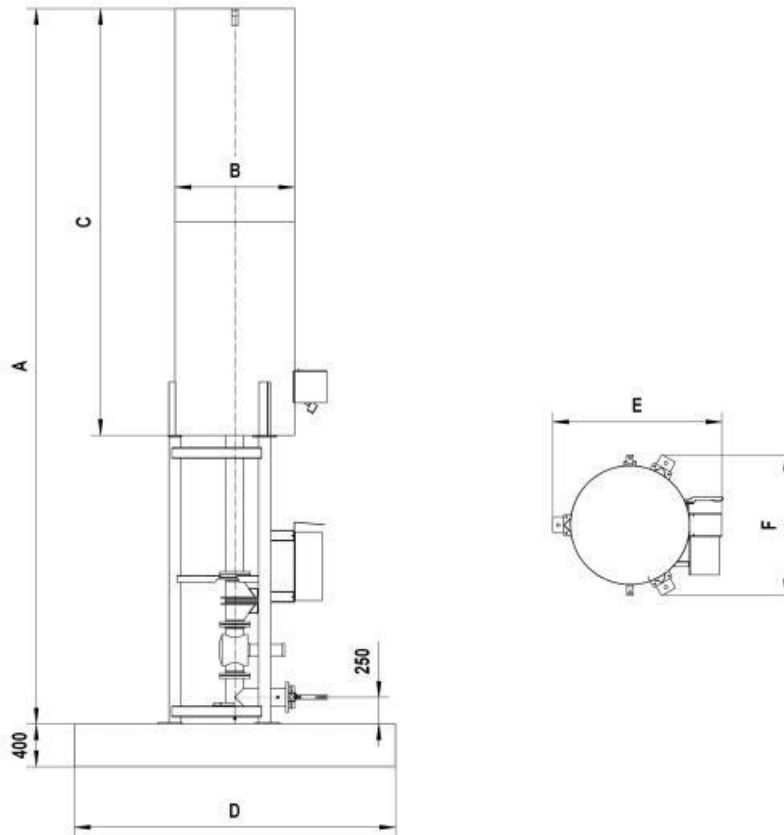
 Puede integrar pasarela de supervisión y gestión web **EXEON Plus**
**Ventajas**

- Motor a gas heavy-duty LIEBHERR G9408 de última generación.
- Optimizado para máximo rendimiento eléctrico con fiabilidad garantizada.
- Control de combustión Senertronik con sondas de temperatura en los cilindros.
- Recuperación de calor integrada con primario y secundario.
- Control industrial para una total flexibilidad. Pantalla táctil.
- Cabinado compacto, practicable y listo para conectar.

**Construcción:** Módulo compacto de cogeneración compuesto por motor a gas de ocho cilindros en V y 17,2 litros, acoplado directamente mediante transmisión amortiguada a un alternador síncrono refrigerado por aire de 3x400V a 50 Hz para trabajo en paralelo con la red. Motor y generador montados elásticamente sobre bastidor de acero con bandeja inferior de recogida de líquidos. Circuito primario de recuperación de calor de motor y evacuación de gases de escape completo e independiente mediante intercambiador de calor de placas. Bomba de secundario y válvula de aumento de temperatura de retorno (anticondensados) integrados. Incluye grupo de regulación de gas a partir de presión de suministro 20-50 mbar y salida de humos con catalizador de oxidación y silenciador. PLC de control Siemens S7-300 con interfaz mediante pantalla táctil y comunicaciones configurables montada en cuadro eléctrico sobre el frontal del cabinado. Instrumentación completa para operación automática gobernada por demanda térmica y/o eléctrica. Todo el conjunto se monta en un encapsulado de protección y aislamiento acústico con paneles laterales completamente abatibles y ventilación forzada.



**HOFGAS® - IFL1c**



**Especificación de las unidades estándar**

HOFGAS®-	Caudal de biogás (máx.) Nm <sup>3</sup> /h	Capacidad quemador (máx.) kW	Brida de conexión DN/PN	Presión entrada gas a plena carga (min.) mbar	Distancia A mm	Distancia B mm	Distancia C mm	Distancia D mm	Distancia E mm	Distancia F mm	P <sub>seo</sub> (aprox.) kg
<b>IFL1c 60</b>	<b>60</b>	<b>450</b>	<b>50/16</b>	<b>25</b>	<b>6'200</b>	<b>Ø 640</b>	<b>3'500</b>	<b>2'500</b>	<b>1'100</b>	<b>730</b>	<b>500</b>
IFL1c 120	120	900	65/16	25	6'700	Ø 800	4'000	3'000	1'170	1'000	500
IFL1c 180	180	1'350	80/16	25	6'700	Ø 800	4'000	3'000	1'170	1'000	650
IFL1c 240	240	1'800	80/16	25	6'700	Ø 960	4'000	3'000	1'330	1'160	850
IFL1c 360	360	2'700	100/16	25	7'200	Ø 1'120	4'000	3'000	1'600	1'350	1'150
IFL1c 480	480	3'600	125/16	25	6'700	Ø 1'280	4'000	4'000	1'730	1'480	1'350
IFL1c 600	600	4'500	150/16	25	6'700	Ø 1'280	4'000	4'000	1'730	1'480	1'400
IFL1c 760	760	5'700	150/16	25	6'200	Ø 1'440	4'000	4'000	1'890	1'640	1'600
IFL1c 900	900	6'750	200/16	25	6'200	Ø 1'440	4'000	4'000	1'890	1'640	1'650

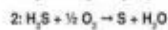
DMT BioSulfurex® Tabla de selección

DMT BioSulfurex®	250 Nm <sup>3</sup> /h	500 Nm <sup>3</sup> /h	1.000 Nm <sup>3</sup> /h	1.500 Nm <sup>3</sup> /h	2.500 Nm <sup>3</sup> /h	5.000 Nm <sup>3</sup> /h
1.000 ppm H <sub>2</sub> S	CGSB-A	CGSB-B	CGSB-B	CGSB-C	CGSB-C	CGSB-E
2.000 ppm H <sub>2</sub> S	CGSB-B	CGSB-B	CGSB-C	CGSB-D	CGSB-E	CGSB-F
5.000 ppm H <sub>2</sub> S	CGSB-B	CGSB-C	CGSB-D	CGSB-E	CGSB-F	2 x CGSB-F
10.000 ppm H <sub>2</sub> S	CGSB-C	CGSB-D	CGSB-E	CGSB-F	2 x CGSB-F	4 x CGSB-F
15.000* ppm H <sub>2</sub> S	CGSB-D	CGSB-E	CGSB-F	2 x CGSB-E	3 x CGSB-F	5 x CGSB-F

\*A petición del cliente se diseñan flujos o concentraciones mayores

DMT BioSulfurex® Sistema de remoción de H<sub>2</sub>S garantizada - Principio químico del proceso y opciones del producto

Las principales reacciones que se van a presentar en el BioSulfurex® son:



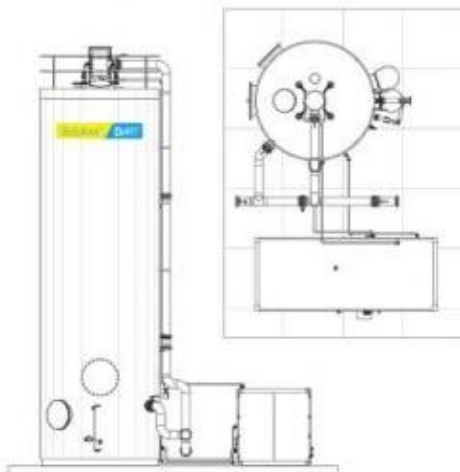
Los parámetros importantes para el proceso son la temperatura y la concentración de oxígeno: bajas temperaturas de proceso llevarían a menor actividad biológica y por lo tanto menor eficiencia de remoción; baja concentración de oxígeno llevaría a formación de azufre elemental y un aumento en la posibilidad de obstrucción del material de empaque (reacción 2).

Es por ello que el DMT BioSulfurex® estándar viene equipado con un sistema de calentamiento y medición constante de oxígeno y temperatura.

Las opciones del sistema DMT BioSulfurex®

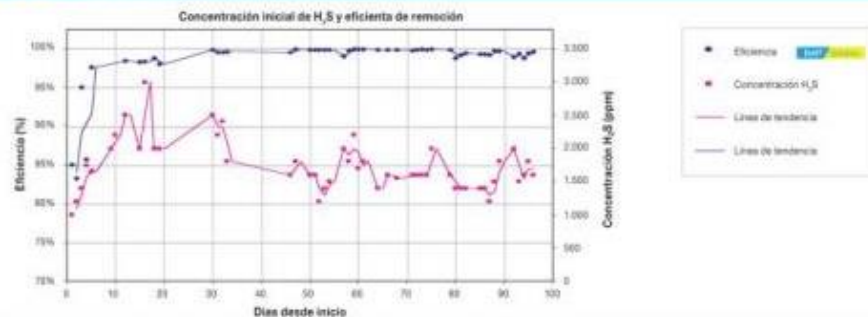
Los sistemas Biosulfurex® y Sulfurex® se pueden combinar para garantizar la remoción de H<sub>2</sub>S durante todo momento - por ejemplo en periodos de mantenimiento o inicio, o durante puntos altos de carga de H<sub>2</sub>S. El biogás también se puede condicionar utilizando el sistema de secado integrado del Sulfurex®.

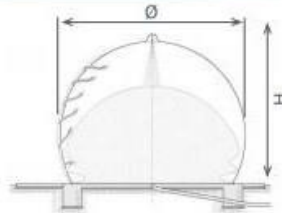
Dimensiones externas del DMT BioSulfurex®



DMT BioSulfurex®	BioSulfurex® Dimensiones	
Tipo*	Diámetro (m)	Altura (max)
CGSB-A	1,5	5,0
CGSB-B	2,0	10,0
CGSB-C	2,5	12,5
CGSB-D	3,0	15,0
CGSB-E	3,5	17,5
CGSB-F	4,0	20,0

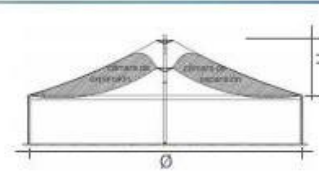
Concentración inicial de H<sub>2</sub>S y eficiencia de remoción



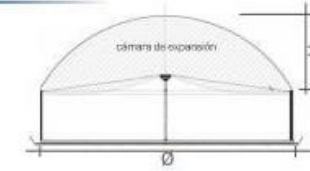


### SATTLER DMGS

designación del tipo	capacidad efectiva	diámetro / altura		presión máxima [mbar]
		Ø	H	
B9 108/205	50 m³	4,9 m	3,7 m	50
B9 109/205	70 m³	5,5 m	4,1 m	50
B9 110/205	100 m³	6,1 m	4,6 m	50
B9 111/205	130 m³	6,8 m	5,1 m	50
B9 112/205	170 m³	7,4 m	5,5 m	50
B9 113/205	210 m³	8,0 m	6,0 m	50
B9 114/205	270 m³	8,6 m	6,5 m	50
B9 115/205	330 m³	9,2 m	6,9 m	49
B9 116/205	400 m³	9,8 m	7,4 m	46
B9 117/205	480 m³	10,4 m	7,9 m	43
B9 118/205	570 m³	11,1 m	8,3 m	40
B9 119/205	670 m³	11,7 m	8,8 m	38
B9 118/250	780 m³	12,6 m	9,5 m	35
B9 117/250	1.040 m³	13,4 m	10,1 m	33
B9 118/250	1.190 m³	14,2 m	10,7 m	31
B9 119/250	1.350 m³	15,0 m	11,2 m	29
B9 120/250	1.530 m³	15,8 m	11,8 m	27
B9 121/250	1.920 m³	16,6 m	12,4 m	26
B9 122/250	2.150 m³	17,2 m	12,9 m	25
B9 123/250	2.380 m³	18,1 m	13,6 m	23
B9 124/250	2.640 m³	18,9 m	14,2 m	22
B9 125/250	3.200 m³	19,7 m	14,7 m	21
B9 126/250	3.510 m³	20,4 m	15,3 m	20
B9 127/250	3.840 m³	21,1 m	15,9 m	20
B9 128/250	4.560 m³	22,0 m	16,5 m	19
<b>B9 129/250</b>	<b>4.950 m³</b>	<b>22,8 m</b>	<b>17,1 m</b>	<b>18</b>
B9 130/250	5.360 m³	23,5 m	17,6 m	17



### CENO BGD



### SATTLER DMGS TM

diámetro	23°				40°			cuarto de esfera			semiesfera		
	Altura de los depósitos	capacidad efectiva	presión máxima*		Altura de los depósitos	capacidad efectiva	presión máxima*	Altura de los depósitos	capacidad efectiva	presión máxima*	Altura de los depósitos	capacidad efectiva	presión máxima*
m	m	m³	mbar		m	m³	mbar	m	m³	mbar	m	m³	mbar
10	2,1	59			4,2	89		2,5	95	30	5,0	230	40
11	2,3	79			4,6	130		2,8	127	22	5,5	310	28
12	2,5	104			5,0	178		3,0	163	22	6,0	400	28
13	2,8	118			5,5	232		3,3	210	22	6,5	510	28
14	3,0	145			5,9	285		3,5	260	22	7,0	640	28
15	3,2	171			6,3	343		3,8	320	22	7,5	790	28
16	3,4	198			6,7	414		4,0	390	16	8,0	960	20
17	3,6	236			7,1	498		4,3	470	16	8,5	1150	20
18	3,8	281			7,6	581		4,5	550	16	9,0	1370	20
19	4,0	326			8,0	678		4,8	650	16	9,5	1610	20
20	4,2	373			8,4	774		5,0	760	16	10,0	1880	20
21	4,5	426			8,8	880		5,3	880	12	10,5	2180	16
22	4,7	487			9,2	985		5,5	1010	12	11,0	2500	16
23	4,9	555			9,6	1135		5,8	1160	12	11,5	2860	16
24	5,1	630			10,1	1284		6,0	1320	12	12,0	3250	16
25	5,3	686	2		10,5	1482	2	6,3	1490	12	12,5	3680	16
26	5,5	772			10,9	1609		6,5	1680	10	13,0	4140	14
27	5,7	889			11,3	1786		6,8	1880	10	13,5	4630	14
28	5,9	990			11,7	1963		7,0	2100	10	14,0	5170	14
29	6,2	1077			12,2	2217		7,3	2330	10	14,5	5740	14
30	6,4	1151			12,6	2471		7,5	2580	10	15,0	6360	14
31	6,6	1260			13,0	2676		7,8	2850	8	-	-	-
32	6,8	1403			13,4	2980		8,0	3130	8	-	-	-
33	7,0	1551			13,8	3177		8,3	3430	8	-	-	-
34	7,2	1706			14,3	3473		8,5	3760	8	-	-	-
35	7,4	1929			14,7	3761		8,8	4100	8	-	-	-
36	7,6	2098			15,1	4092		9,0	4460	3	-	-	-
37	7,9	2278			15,5	4443		9,3	4840	3	-	-	-
38	8,1	2488			15,9	4813		9,5	5250	3	-	-	-
39	8,3	2668			16,4	5203		9,8	5670	3	-	-	-
40	8,5	2877			16,8	5610		10,0	6120	3	-	-	-

\*Según clasificación de la normativa



## **Anexo II:**

**Estudio completo en el cual se ha basado el proyecto.**







## Original Research Article

## The effect of organic loading rates (OLRs) on the performances of food wastes and maize husks anaerobic co-digestion in continuous mode

H.I. Owamah<sup>a,\*</sup>, O.C. Izinyon<sup>b</sup><sup>a</sup>Department of Civil Engineering, College of Science and Engineering, Landmark University, P.M.B.1001, Omu-Aran, Kwara State, Nigeria<sup>b</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Benin, Benin, Edo State, Nigeria

## ARTICLE INFO

Article history:  
Received 12 February 2015  
Revised 2 May 2015  
Accepted 12 June 2015

Keywords:  
Continuous digestion  
Digester performance  
Biogas yield  
Food waste  
Maize husk

## ABSTRACT

A continuous anaerobic digestion experiment was carried out to investigate the co-digestion of 75% food waste and 25% maize husk at different organic loading rates (OLRs) of 1–4.5 gVS/L/d. Results obtained showed that pH fluctuated between 7.3 and 7.5 and total alkalinity (TA) between 0.4 and 6.7 g CaCO<sub>3</sub>/L, indicating that the system was not inhibited by acidification. The range of the ratio of volatile fatty acid (VFA) to TA of 0.06–0.25 was also well below 0.4 and showed that the anaerobic co-digestion was stable and feasible. Though there was no significant difference ( $p < 0.05$ ) between biogas yields at OLRs of 3.5 and 4.5 gVS/L/d, the methane content at OLR of 4.5 gVS/L/d was higher than that of 3.5 gVS/L/d and suggests that carbon dioxide producing microorganisms were more active in OLR of 3.5 gVS/L/d. The OLR of 4.5 gVS/L/d was therefore found to be the most satisfactory for large scale operation of anaerobic digesters for co-digestion of food waste and maize husk. From a separate batch test, the average biogas yield of  $0.50 \pm 0.04$ ,  $0.24 \pm 0.02$  and  $1.31 \pm 0.07$  L/gVS were obtained from digesters A, B and C, respectively, indicating that the addition of maize husk to digester C significantly improved the production of biogas from food waste when compared to the biogas yield of digester A that contained food waste alone. Digester B with 100% maize husk was by far the least performed digester.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## Introduction

Nigeria and many other developing countries in Africa and Asia are faced severely with the problems of inadequate energy supply and environmental pollution. With the tremendous increase in her population, access to adequate energy and healthy environment demands for a diversification of sources of energy supply, if Nigeria is to achieve any meaningful growth and development. At the moment, Nigeria has a population of about 160 million people but generates on the average only about 3000–3500 MW of energy mainly from hydro and thermal systems [18,7,19]. Furthermore, while South Africa, Brazil, UK and Germany, etc, have 900, 500, 1340, 1500 Watts/person respectively, in Nigeria, available energy person is less than 25 Watts [18]. This according to Oyedepo [22], represents a serious energy crisis and has paralyzed many commercial and industrial enterprises. The Council for Renewable Energy of Nigeria has predicted that power outages cause an annual loss of about 126 billion naira to the Nigerian economy [22].

The situation has additionally caused some health challenges as a result of exposure to carbon and other emissions from electricity generating sets, unemployment and other attendant social vices [22]. On the other hand, the over-dependence of the global economy on fossil fuels such as natural gas and petroleum which are non-renewable has led to a rapid depletion of the reserves. Moreover, exploiting, processing and combusting of these fossil fuels represent a dangerous threat to the already weak environment. In the present face of fast economic growth and technological advancement, satisfying the demand for energy without further deterioration of the environment would require the deliberate development of low emission, alternative energy systems [31]. Biogas production from anaerobic digestion seems to be a right technology for solving the above listed problems.

A huge amount of maize is produced annually in Nigeria, resulting in the generation of large quantities of maize husks (MH) as wastes. Though at the moment, there is no easily accessible documented information on the actual amount of maize husk generated in Nigeria, the FMAWR [8] has estimated that about 4.11 million tonnes of maize residues are generated annually in Nigeria. These maize residues comprise mainly straw, husks, skin and trimmings, and cobs. Maize husks are usually burnt in open places or used as fire starter for cooking purposes in rural Nigerian

\* Corresponding author. Tel.: +234 8035705814.

E-mail addresses: [owamah.hilary@lmu.edu.ng](mailto:owamah.hilary@lmu.edu.ng), [isahilla222@yahoo.com](mailto:isahilla222@yahoo.com) (H.I. Owamah), [izinyon2006@yahoo.com](mailto:izinyon2006@yahoo.com) (O.C. Izinyon).

communities. These disposal methods are wasteful and impacts negatively on climate.

Food waste (FW) in Nigeria, from residential and non residential sources has been on the increase at an alarming rate, due to rapid increase in population and living standards. Again, at the moment, there is no documented information on the amount of food waste generated in Nigeria. However, according to the Food and Agriculture Organization of the United Nations, over 30% of all food processed/manufactured for human consumption ultimately ends up as waste to give about  $1.3 \times 10^3$  billion kg [17]. This large amount of food waste is evenly distributed between the developed and the developing countries. Presently in Nigeria, management of food waste (FW), which constitutes one of the largest portions of our municipal solid waste (MSW), has been a severe challenge to the three tiers of government as Nigeria has over 160 million people that feed on different diets daily [3].

Although food waste and maize husks are two major sources of organic wastes that can be co-digested for energy production, the feasibility of this kind of co-digestion is presently in lack of publications and engineering applications. Furthermore, the mono digestion of FW had been found to be inefficient and unstable due to the low C/N ratio and very volatile organic fraction in FW that often lead to acidification of the fermentation process [27,11]. For this reason, the co-digestion of FW with some agro wastes have been suggested and studied [27,25,29].

Food wastes are co-digested with agro wastes for the adjustment of C/N ratio, improvement of biogas yield, and utilization efficiency [27]. Furthermore, most biogas production studies in literature were conducted under batch mode. It therefore becomes difficult for such studies to simulate the real performance conditions of large scale plants. This limits the usefulness of data from batch operations, as most industrial anaerobic plants are usually operated in continuous mode. This study therefore also aims to investigate the stability and other performance criteria of the anaerobic co-digestion of food waste and maize husk for optimum biogas production in a continuous digestion mode.

## Materials and method

### Collection of materials

Food waste used for this study was collected from the Waste bins at the Cafeteria of Landmark University, Omu-Aran, Kwara State. The collections were done on daily basis, within five working days of a week, from Monday 24th March to Friday 28th March, 2014. In accordance with the procedure in Owamah et al. [20], the food waste was collected at 12 noon and 7 pm of each day, to coincide with students' time of peak consumption and waste generation. The purpose of collecting food waste over 5-working days was to reduce nutritional variations in the food waste collected. The maize husks were obtained from Landmark University Farm, Omu-Aran, Kwara State. It was initially kept dry in a sack, in the Environmental Engineering Laboratory of Landmark University, prior to the commencement of the anaerobic digestion experiments.

### Substrates preparations

#### Food waste

Following the procedures used in Zhang et al. [28] and El-Mashad and Zhang [6], the bones and inorganic materials in the food waste were sorted out within 24 h of collection. This was followed by the crushing and homogenization of the food waste using a mini electric blender. The blended food waste was

then kept in a freezer at approximately 4 °C, before the commencement of anaerobic digestion experiment in April 10, 2014.

#### Maize husks

Following the procedure in Zhu et al. [30], the collected maize husks were ground to powdery form using a grinder. Ground maize husk was then kept in a container that was air tight until it was used for the experiment.

### Analysis of chemical parameters of the prepared food waste and maize husk substrates

The prepared food waste and maize husk substrates, before they were mixed together for anaerobic digestion experiments were analyzed for their relevant chemical parameters. The total solids (TS) and volatile solids (VS) were measured in triplicate according to the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [2] using a laboratory oven, model DHG-9053A, manufactured by Controls, Italy. Following standard procedures in APHA [2], the food waste and maize husk substrates were also analyzed for ( $\text{NH}_4^+$ -N, TKN, Cl, P, K, S, Na, Ca, Mg) using a direct-reading photometer (Palintest Photometer, models 7100 and 7500) manufactured in England by ELE. Carbon content of the substrates were measured using standard procedures in APHA [2].

The initial pH values of the food waste and maize husk substrates were measured using pH meter, model PHS-3C, manufactured by SEARCH TECH, United Kingdom. Weighing balance, model KERN 572 manufactured by KERN and SOHN, Germany was used for measuring the mass of the substrates. The values of the chemical parameters obtained for each of the prepared food waste and maize husk substrates are shown in Table 1.

### The continuous anaerobic digestion experiment

The continuous anaerobic digestion experiment was designed with the aim of approaching real conditions of industrial/large scale biogas plants, which are usually operated in continuous mode. Two computer controlled anaerobic digester with two reactors each were used for the continuous anaerobic digestion experiment. The optimum mixture ratio of 75% food waste and 25% maize husk and I/S ratio 1 [21], was used for the continuous digestion experiment. The effluent from an anaerobic digester handling similar substrate was used as inoculum. In line with Li et al. [13], the continuous anaerobic digestion experiment involved the step-wise loading of the reactors of the digester with prepared substrates of four different organic loading rates (OLRs) of 1, 2.5, 3.5, and 4.5 gVS/L/d and was operated for over 120 days. Organic loading rate, also known as volume load means the amount of organic dry solids loaded per liter volume of digester reactor per unit time.

**Table 1**  
Chemical characteristics of the prepared food waste and maize husk substrates.

Parameter	Food waste	Maize Husk
TS(X)	26.6 ± 0.3	10.5 ± 1.2
VS(X)	18.4 ± 1.2	8.6 ± 0.8
$\text{NH}_4^+$ -N(X)	1.7 ± 0.2	0.8 ± 0.2
TKN(X)	1.8 ± 0.2	0.7 ± 0.2
Cl(X)	1.3 ± 0.3	1.8 ± 0.5
P(X)	2.9 ± 0.1	3.7 ± 0.1
Ca(X)	5.4 ± 0.5	0.8 ± 0.3
Mg(X)	1.6 ± 0.2	1.9 ± 0.1
K(X)	3.5 ± 0.3	2.3 ± 0.1
S(X)	2.2 ± 0.1	4.1 ± 0.4
Na(X)	3.4 ± 0.3	2.7 ± 0.2
pH	4.8 ± 0.1	7.2 ± 0.9
C/N ratio	13 ± 0.4	74.3 ± 2.1



which can be delivered without overfeeding the bacteria, which could lead to process stress [5]. The continuous anaerobic digestion experiment got to steady state within 20, 9, 6, 3 days for OLRs 1, 2.5, 3.5, and 4.5 gVS/L/d, respectively. Total, and volatile solid contents of the inoculum, pH, and C/N ratio are  $6.8 \pm 0.3$ ,  $3.4 \pm 0.1$ , 7.5 and 6.6, respectively.

The reactors of the digesters were run steadily at mesophilic temperature of  $37 \pm 1$  °C, through an inbuilt water bath of the anaerobic digesters. The substrate was fed continuously from overhead influent tanks into the reactors through inbuilt peristaltic

pumps and flow meters in the computer controlled anaerobic digester. The volume of biogas produced was measured daily at 12 noon, through water displacement method from the volumetric tank of the anaerobic digester. In line with Boe et al. [4], the displaced water was initially acidified to pH 3 using hydrochloric acid (HCl) before the addition of sodium chloride (NaCl), to prevent the dissolution of CO<sub>2</sub> into water. The temperature and pH of the anaerobic digestion process was constantly measured online through the inbuilt sensors of the digester. The experiments were run in duplicates and mean values of daily biogas production were



Fig. 1. Picture of the computer controlled anaerobic digester (PDANC model) set-up used for the study (EDIBON, 2014).

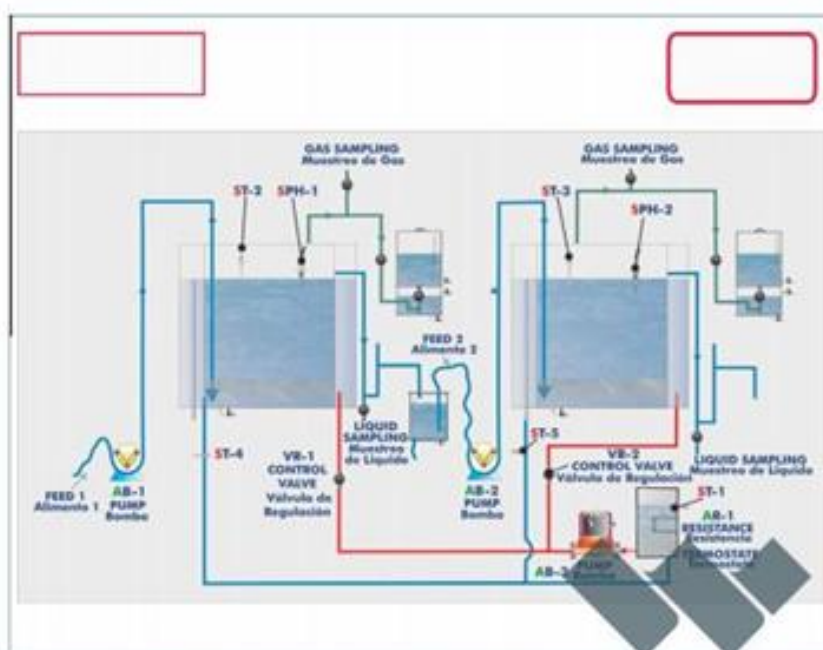
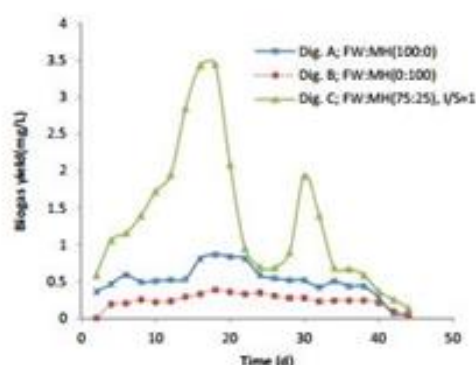


Fig. 2. Flow diagram of the computer controlled anaerobic digester (adapted from the manufacturer's (EDIBON) user manual, 2014).

**Table 2**  
Feeding substrate characteristics for the continuous anaerobic digestion experiment.

Feeding substrate	Parameter values
FW:MH(X) (w/w, based on total weight (g))	75:25
Total weight of sample (g)	30
Weight of FW (g)	22.55
Weight of MH (g)	7.50
VS (X)	6.8
C/N ratio	23.4
pH	6.8
IP	1



**Fig. 3.** Daily biogas production.

recorded. Two blank digesters containing only the inoculum and water were operated at the same mesophilic temperature of  $37 \pm 1$  °C in order to obtain the background biogas production from the inoculum. The average background biogas production of the inoculum was thereafter subtracted from biogas produced. Initial TS of feeding substrates was maintained at 8%, through dilution with water in order to achieve the specified TS range for low solid wet anaerobic digestion [26] and also to increase the fluidity of the substrates for ease of pumping by the peristaltic pumps. The methane content of biogas was analyzed twice in a week using a gas chromatograph (BUCK GC122, China) equipped with a Stabilwax-DA column ( $30 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm} \times 0.5 \mu\text{m}$ ) and FID. Nitrogen gas was used as carrier gas at a flow rate of 5.2 mL/min. The column and detector temperatures were set at 40 and 200 °C, respectively. A sample picture and flow diagram of the computer controlled anaerobic digester are shown in Figs. 1 and 2, respectively. Total ammonia-nitrogen (TAN), total alkalinity (TA), and volatile fatty acids (VFA) in the digestate were analyzed two times in a week (Mondays and Fridays) in accordance with Standard Methods for Examination of Water and Wastewater [2,13] using liquid digestate samples (supernatant liquid or leachate) obtained through the opening of the valve of the designated pipe connected to the digester. The VS, Carbon, nitrogen, pH, were determined using standard procedures in APHA [2]. The

determined feeding (influent) substrate characteristics for the continuous digestion experiment are shown in Table 2. The effect of maize husk addition to food waste on biogas production was equally studied by the batch anaerobic digestions of food waste, maize husk, and a mixture of 75% food waste and 25% maize husk in digesters A, B and C, respectively, for 44 days. Limited quantity of inoculum ( $I/S = 1$ ) was also added into digester C.

## Results and discussion

### Effect of maize husk addition to food waste on biogas production

Food waste, maize husk and mixture of food waste and maize husk were digested in digesters A, B and C, respectively. The daily record of biogas yield after anaerobic digestion for 44 days is shown in Fig. 3. Digester C, with a combination of 75% FW and 25% MH was found to have higher biogas yield than digesters A and B that respectively contained only food wastes, and maize husk. The performance of digester C was followed by digester A that had 100% FW. The least performed digester is digester B with 100% MH. This abysmal performance obtained in digester B could be linked to the high C/N ratio (Table 1), above the recommended limit of 20–35 [9,23] and higher lignin content [16]. While high C/N ratio results in acidification which inhibits methanogenic activities ([23]), high lignin content inhibits initial hydrolysis of substrates. As shown in Fig. 3, the initial increase in biogas production in digester A that contained only food waste could not be sustained for a long time, probably due to the accumulation of intermediates at the initial stage of digestion [6]. Fig. 3 also shows that this problem was however overcome in digester C by the introduction of maize husk as a co-substrate as evidenced in the prolonged increase in biogas production to a reasonably high peak. El-Mashad and Zhang [6] had a similar observation for the co-digestion of food waste and dairy manure, and digestion of food waste alone. They obtained higher biogas yield from the mixture of food waste and dairy manure than from the digestion of food waste alone, after the early stage of digestion. This therefore confirms the pattern of results obtained from this study.

After the 44 days of digestion, total biogas produced for digesters A, B, and C was found to be 11.10, 5.24 and 28.92 L/gVS, respectively (Fig. 4). The cumulative biogas production in Fig. 4 also indicates clearly that digester C has a more efficient degradation and performance in terms of biogas production than the other digesters. This result therefore shows that the co-digestion of FW with agro-wastes such as maize husk can enhance its biogas production by reducing the problem of early acidification, usually caused by low C/N ratio and very volatile organic components of food waste. Anaerobic co-digestion of food waste and maize husk could therefore serve as a means of treating both wastes, with the added benefit of contributing to solving energy problems through biogas generation and utilization.

Statistical analysis using two-way analysis of variance (ANOVA) without replication ( $p < 0.05$ ), shows that there was a significant difference in the biogas yield from the different digesters. The average biogas yield of  $0.50 \pm 0.04$ ,  $0.24 \pm 0.02$  and  $1.31 \pm 0.07$  L/gVS

**Table 3**  
Operation conditions and performance of the continuous anaerobic digestion at steady state.

OLR (gVS/L/d)	TS removal (X)	VS removal (X)	$\Theta$ (Days)	VMP (L <sub>biogas</sub> /L <sub>reactor</sub> ·volume·time)	TA (gCaCO <sub>3</sub> /L)	TAN (g/L)	VFA (g/L)	VFA/TA	pH
1	78.2 ± 2.2	80.7 ± 4.5	68	0.7 ± 0.02	0.4 ± 0.64	0.3 ± 0.11	0.5 ± 0.13	0.22 ± 0.03	7.31 ± 0.07
2.5	72.2 ± 3.1	76.5 ± 2.8	27	1.53 ± 0.02	4.5 ± 0.37	0.9 ± 0.06	0.5 ± 0.14	0.11 ± 0.01	7.39 ± 0.08
3.5	68.5 ± 2.6	74.3 ± 3.1	19	2.40 ± 0.01	5.8 ± 0.15	1.4 ± 0.04	0.5 ± 0.02	0.09 ± 0.01	7.41 ± 0.08
4.5	75.2 ± 1.8	78.3 ± 1.6	15	3.40 ± 0.02	6.7 ± 0.19	1.3 ± 0.01	0.4 ± 0.03	0.06 ± 0.01	7.5 ± 0.05

OLR (organic loading rate), VS removal (volatile solid removal),  $\Theta$  (hydraulic retention time), VMP (volumetric biogas productivity), TA (total alkalinity), TAN (total ammonia-nitrogen), VFA (volatile fatty acids), TS removal (total solid removal).



**Table 4**  
Average biogas yield and methane content of the continuous digestion.

OLR (gVS/L/Day)	Average biogas yield (L/gVS)	Standard error L/gVS (Biogas yield)	Methane content (%)	Standard Error% (methane content)
1	0.63	0.06	63.5	2.6
2.5	0.64	0.06	63.7	2.8
3.5	0.70	0.07	63.8	2.4
4.5	0.72	0.09	67.0	2.1

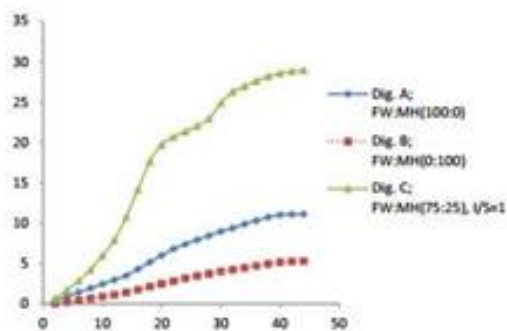


Fig. 4. Cumulative daily biogas production.

were obtained from digesters A, B and C, respectively. Digesters A, B and C had their peak biogas production between the 18 and 20th day of digestion. The much higher biogas production in digester C could be attributed to better synergy of microorganisms in the digester as a result of the presence of inoculum and some quantity of maize husk. The presence of maize husk helped to bring the C/N ratio of the mixed substrate to 23.4, which is within the good range required for optimum biogas production [15,24]. Again, digester C with highest average biogas yield, also had cleaner biogas (in terms of methane content) than digester A and B.

#### Effects of OLRs on continuous anaerobic digestion

Continuous anaerobic digestion experiment was carried out to investigate the performance of digester under different organic loading rates (OLRs) of 1, 2.5, 3.5 and 4.5 gVS/L/d. It was observed that the pH fluctuated between 7.3 and 7.5 (Fig. 5). Furthermore, total alkalinity (TA) also fluctuated between 0.4 g CaCO<sub>3</sub>/L and 6.7 g CaCO<sub>3</sub>/L (Fig. 5 and Table 3). This shows that the digestion process did not experience any inhibition by acidification [13,1]. During the different organic loadings, volatile fatty acid to TA

(VFA/TA) ratio was found to be in the range of 0.06–0.22 (Fig. 5). Li et al. [14] and Li et al. [13] have reported that a VFA/TA ratio under 0.4 was suitable for feasible anaerobic digestion and could be applied to evaluate digester stability. This indicates that when the ratio of VFA to TA is under 0.4, the digester could be said to be stable.

The range of total ammonia-nitrogen (TAN) concentration was 0.3 to 1.3 g/L in response to increase in OLR (Table 3). This range of TAN was reported to enhance digester stability by acting as buffer [12]. Higher TAN range of 3.1–3.4 g/L was obtained by Agyeman and Tao [1] for the anaerobic digestion of food waste and cattle manure between OLR of 0.67 and 3. Li et al. [13] also obtained a TAN range of 0.5–1.7 g/L when chicken manure and corn stover were digested between OLRs of 1 and 4 gVS/L/d.

Inhibitory effect usually occurs when TAN concentration was higher than 6 g/L [10]. The results of this continuous digestion experiment generally suggest that the anaerobic co-digestion of 75% food waste and 25% maize husk at I/S ratio of 1 was feasible and stable. The average biogas yield and methane content of the continuous anaerobic digestion are shown in Table 4. At OLR of 1, 2.5, 3.5, and 4.5 gVS/L/d, biogas produced was 0.63 ± 0.06, 0.64 ± 0.06, 0.70 ± 0.07, and 0.72 ± 0.09 L/gVS<sub>added</sub> (Table 4). The maximum biogas yield of 0.72 L/gVS obtained at OLR of 4.5 gVS/L/d is relatively higher than the maximum biogas yield of 445 mL/gVS obtained at OLR 4.0 gVS/L/d by Li et al. [13] from the co-digestion of chicken manure and corn stover. Specific biogas yield of 0.67 L/gVS was also obtained at OLR 3.0 gVS/L/d from the co-digestion of food waste and dairy manure [1]. The content of methane in the biogas produced from OLR 1, 2.5, 3.5, and 4.5 gVS/L/d is 63.5 ± 2.6, 63.7 ± 2.4, 63.8 ± 2.4, and 67 ± 2.1 respectively (Fig. 6). There was only a slight increase in methane content and biogas yield, when the OLR increased from 1 to 2.5 gVS/L/d. This is contrary to the report of Agyeman and Tao [1] where 101–116% increase in biogas yield was obtained, when OLR was increased from 1 to 2 gVS/L/d in the continuous anaerobic co-digestion of food waste and dairy manure. It therefore shows that the effect of OLR variation on biogas yield depends largely on the nature of substrate.

However, a significant increase in biogas yield was obtained when the OLR was increased from 2.5 to 4.5 gVS/L/d, which indicates the adaptation of the microorganisms to higher OLR conditions. Increase in OLR usually leads to increase in available microorganisms as shown by the increase in VS concentration in the effluent (Table 3). This therefore promotes better degradation of substrates and more efficient production of biogas. Agyeman and Tao [1] have obtained similar result of increase in effluent VS concentration as OLR increased from 0.67 to 3 gVS/L/d. From the statistical analysis of result obtained, biogas yields at OLR 3.5 and 4.5 gVS/L/d were significantly higher ( $p < 0.05$ ) than biogas

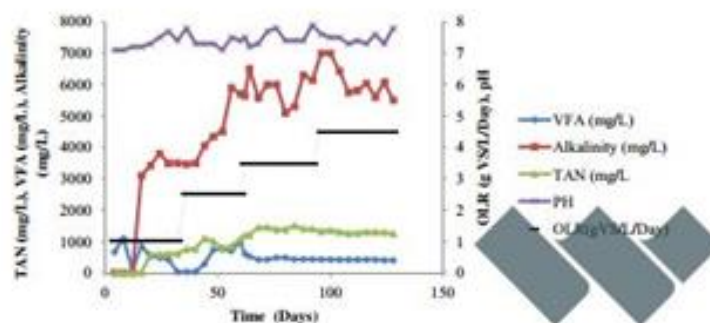


Fig. 5. Parameters monitoring during the continuous anaerobic digestion.

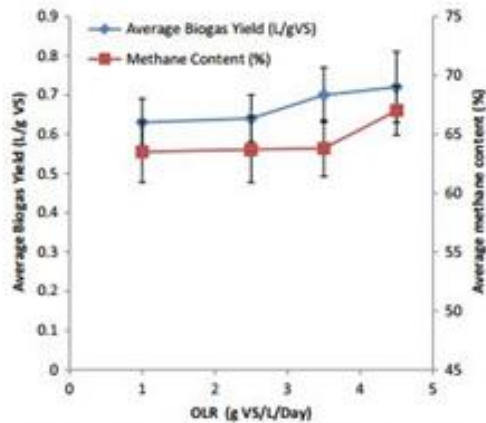


Fig. 6. Average biogas production and methane percentage during the continuous digestion at steady stage.

yields at OLR 1 and 2.5 gVS/L/d. There was actually no significant difference ( $p < 0.05$ ) between biogas yields at OLRs of 3.5 and 4.5 gVS/L/d but methane content at OLR of 4.5 gVS/L/d was higher than that of 3.5 gVS/L/d. This according to Li et al. [13] suggests that irrespective of the fact that methanogenic microorganisms were considered active in OLRs of 3.5 and 4.5 gVS/L/d, the carbon dioxide producing microorganisms were more active in OLR of 3.5 than that of 4.5 gVS/L/d, which invariably resulted in a lower methane content at OLR of 3.5 gVS/L/d. There was an observed increase in the concentration of TS and VS in the effluent as OLR increased from 1 to 4.5 gVS/L/d (Table 3). However, moderate removal efficiencies of 75.2% and 78.3% for TS and VS were obtained at OLR of 4.5 gVS/L/d (Table 3). All these therefore show that the optimum OLR for the anaerobic co-digestion of food waste and maize husk at mesophilic temperature is 4.5 gVS/L/d. Aggeman and Tao [1] reported that the optimum OLR for the mesophilic co-digestion of dairy manure and food waste is 3 gVS/L/d. Li et al. [13] also obtained OLR of 4.0 gVS/L/d for the anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover.

## Conclusion

The biogas production performance and digester stability assessment of co-digestion of food waste and maize were performed at OLRs 1–4.5 gVS/L/d. The pH and total alkalinity were found to be between 7.3 and 7.5 and 0.4 g CaCO<sub>3</sub>/L and 6.7 g CaCO<sub>3</sub>/L, respectively, showing that the digestion process did not experience inhibition by acidification. Volatile fatty acid to total alkalinity (VFA to TA) ratio was found to be in the range of 0.06–0.22. This range is below the recommended maximum limit of 0.4 and hence shows that the digestion of 75% FW and 25% MH was stable and could be used for large scale production of biogas. At OLRs of 1, 2.5, 3.5, and 4.5 gVS/L/d, biogas produced was  $0.63 \pm 0.06$ ,  $0.64 \pm 0.06$ ,  $0.70 \pm 0.07$ , and  $0.72 \pm 0.09$  L/gVS<sub>added</sub>. The content of methane in the biogas produced from OLRs 1, 2.5, 3.5, and 4.5 gVS/L/d was  $63.5 \pm 0.6$ ,  $63.7 \pm 0.5$ ,  $63.8 \pm 0.3$ , and  $67 \pm 0.7$ , respectively. The addition of maize husk to digester C significantly improved the production of biogas from food waste when compared to the biogas yield of digester A that contained food waste alone.

## References

- [1] Aggeman FO, Tao W. Anaerobic co-digestion of food waste and dairy manure: effects of food waste particle size and organic loading rate. *J Environ Manage* 2014;133:268–74.
- [2] APHA. Standard Methods for Examination of Water and Waste-water. 22nd Ed. Washington DC, USA: American Public Health Association; 2012.
- [3] Coker A, Sridhar M, Akinyele J. A household composting bin for management of food residuals in Ibadan, Nigeria. *Agric Eng Int: CIGR E J* 2008;1–13.
- [4] Boe K, Damien JB, Jean-Philippe S, Irini A. State indicators for monitoring the anaerobic digestion process. *Water Res* 2010;44:5973–80.
- [5] Dlabaja T, Malatak J. Optimization of anaerobic fermentation of kitchen waste. *Res Agric Eng* 2013;59:1–8.
- [6] El-Mashad HM, Zhang R. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresour Technol* 2010;101:4021–8.
- [7] Efurumbe EL, Asieghu AD, Onusi MJ. Renewable energy and prospects in Nigeria. *Schol J Sci Res Essay (SJSRE)* 2014;3(6):73–6.
- [8] FMAWR (1988). Agricultural policy for Nigeria: Strategies for implementation. Lagos, Federal Ministry of Agriculture, Water Resources and Rural Development.
- [9] Ghasimi SMD, Idris A, Chuah TG, Tey BT. The effect of C:N:P ratio, volatile fatty acids and Na<sup>+</sup> levels on the performance of an anaerobic treatment of fresh leachate from municipal solid waste transfer station. *Afr J Biotechnol* 2009;8(18):4572–81.
- [10] Hansen K, Angelidaki I, Ahring BK. Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia. *Water Res* 1998;32(1):5–12.
- [11] Kawai M, Nagao N, Tajima N, Niwa C. The effect of the labile organic fraction in food waste and the substrate/inoculum ratio on anaerobic digestion for a reliable methane yield. *Bioresour Technol* 2014;157:174–80.
- [12] Lahav O, Morgan BE. Titration methodologies for monitoring of anaerobic digestion in developing countries—a review. *J Chem Technol Biotechnol* 2004;79:1331–41.
- [13] Li Y, Zhang R, He Y, Zhang C, Liu X, Chen C. Anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover in batch and continuous stirred tank reactor (CSTR). *Bioresour Technol* 2014;156:342–7.
- [14] Li Y, Zhang R, He Y, Zhang C, Liu X, Chen C. Comparison of methane production potential, biodegradability, and kinetics of different organic substrates. *Bioresour Technol* 2013;149:565–9.
- [15] Mata-Alvarez J, Mace S, Labres P. Anaerobic digestion of organic solid waste: an overview of research achievements and perspectives. *Bioresour Technol* 2000;74(1):3–16.
- [16] Momoh OKV, Nwaogazie II. The effect of waste paper on the kinetics of biogas yield from the co-digestion of cow dung and water hyacinth. *Biomass Bioenergy* 2011;35:1345–51.
- [17] Nathan C, Pygastien P. Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. *Renewable Energy* 2012;41:2009–5.
- [18] Onoabasi, S. (2014). Darkness at sunrise in Nigeria: Illuminating the dark spot before the sunset. 146th Inaugural Lecture, University of Benin, Benin, Nigeria.
- [19] Owamah, LH, Abanibi V.K., Odikayor C.D. (2012). Trend analysis assessment of power generation in Nigeria and its attendant effect on productivity and economic development: A paper presented at the National Conference of the Nigerian Society of Engineers, held at Kwara Hotel, Ilorin, between 3rd and 7th December, 2012.
- [20] Owamah HL, Dahunsi SO, Ovanusi US, Alfa MI. Fertilizer and sanitary quality of digester biofertilizer from the co-digestion of food waste and human excreta. *Waste Manage* 2014;34:747–54.
- [21] Owamah, HL (2015). Kinetic modeling and optimization study of biogas production from the co-digestion of food waste and maize husk. A PhD thesis submitted to the Department of Civil Engineering, University of Benin, Nigeria.
- [22] Oyedepo S. Energy and sustainable development in Nigeria: the way forward. *Energy Sustain Soc* 2012;2(15).
- [23] Orturk B. Evaluation of biogas production yields of different waste materials. *Earth Sci Res* 2013;2(1).
- [24] Parawika W, Murto M, Zvanaja R, Mattiasson B. Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves. *Renewable Energy* 2004;29:1811–23.
- [25] Shen F, Yuan H, Pang Y, Chen S, Zhu B, Zou D. Performances of anaerobic codigestion of fruit & vegetable waste (FVW) and food waste (FW): single-phase vs. two-phase. *Bioresour Technol* 2013;144:80e5.
- [26] Tchobanoglous, G., Thelen, H., Vigil, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management Engineering: Principles and Management Issues*. Singapore, McGraw-Hill U.S.
- [27] Yong Z, Dong Y, Zhang X, Tan T. Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production. *Renewable Energy* 2015;78:527e530.
- [28] Zhang R, El-Mashad HM, Hartman K, Wang F, Liu G, Choate C, Gamble P. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresour Technol* 2006;98:929–35.
- [29] Zhang C, Xiao G, Peng L, Su H, Tan T. The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresour Technol* 2011;122:7066.
- [30] Zhu J, Yi Z. Food waste and maize husk co-digestion of hay and soybean processing waste for biogas production. *Bioresour Technol* 2014;154:240–7.
- [31] Zieminski K, Romanowski K, Kowalski M. Enzymatic pretreatment of lignocellulosic waste to improve biogas production. *Waste Manage* 2012;32:1131–7.

## **Anexo III:**

### **Abreviaturas, siglas y acrónimos**



F/E: materia prima (feedstock) / efluente (effluent)

OFMSW: fracción orgánica de residuos sólidos municipales

FVW: residuos de fruta y verdura

S/I: ratio sustrato e inóculo

RA: residuo alimenticio

RM: residuo de maíz

SV: sólidos volátiles

AGV: ácidos grasos volátiles

NA: nitrógeno amónico

