



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño e implantación de un biodigestor para la  
comunidad rural de Kazai, Zimbabue*

Autor: L. Teodoro Ruiz Llorente

Director: Miren Tellería

Madrid  
Junio 2020



## **AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO**

### ***1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.***

El autor D. L. Teodoro Ruiz Llorente

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: Diseño e implantación de biodigestor para comunidad rural en Kazai, Zimbabue, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

### ***2º. Objeto y fines de la cesión.***

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

### ***3º. Condiciones de la cesión y acceso***

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

### ***4º. Derechos del autor.***

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

### ***5º. Deberes del autor.***

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

**6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.**

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 14. de junio de 2020

**ACEPTA**



Fdo.: L. Teodoro Ruiz Llorente

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Diseño e implantación de biodigestor para comunidad rural en Kazai,  
Zimbabue  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2019-2020 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es  
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada  
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.:

Fecha: 14/06/2020



L. Teodoro Ruiz Llorente

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.:

Fecha: 14/ 06/ 2020



Miren Tellería





GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño e implantación de un biodigestor en la  
comunidad rural de Kazai, Zimbabue*

Autor: L. Teodoro Ruiz Llorente

Director: Miren Tellería

Madrid  
Junio 2020



## Resumen

### DISEÑO E IMPLANTACIÓN DE UN BIODIGESTOR EN LA COMUNIDAD RURAL DE KAZAI, ZIMBABUE

**Autor: Ruiz Llorente, L. Teodoro.**

Director: Tellería, Miren.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

#### RESUMEN

Este proyecto surge de la necesidad de cubrir las necesidades básicas energéticas que aún sufren zonas rurales de África. En concreto, se centra en diseñar un biodigestor adaptándolo a la aldea de Kazai en Zimbabwe y, posteriormente, ir allí para instalarlo. De esta manera, este trabajo va más allá del aspecto técnico y aborda también una necesidad social.

En el mismo, se presentan los verdaderos problemas y carencias de la generación y del suministro de energía de Zimbabwe y cómo la implantación de un biodigestor puede contribuir a: frenar la deforestación, aumentar la calidad de vida y laboral de las personas locales, hacer que Kazai sea autosuficiente en el aspecto energético con la generación de biogás y mejorar los cultivos a través de la producción de efluente.

# DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A BIODIGESTER IN THE RURAL AREA OF KAZAI, ZIMBABUE

**Author: Ruiz Llorente, L. Teodoro.**

Director: Tellería, Miren.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **PROJECT ABSTRACT**

This project comes up due to the necessity to cover the basic needs regarding energy supply that many rural regions in Africa still suffer. This plan is focused specifically on adapting the design of a biodigester in the small town of Kazai in Zimbabwe, and in the implementation of the model by going there. Therefore, this plan goes beyond the technical facet and also addresses a social scarcity.

In the content, the main problems of energy generation and supply are revealed, as well as how the implementation of the device contributes to: raising the quality of life and the quality of the jobs of the locals, helping Kazai to be self-sufficient regarding energy thanks to the production of biogas and collaborating in the progress of the agriculture thanks to the fertilizer created.

# Índice general

<b>1. Introducción y planteamiento del proyecto</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.1.1. Aspectos básicos de Zimbabwe . . . . .	1
1.1.2. Aspectos básicos del proyecto . . . . .	6
1.2. Motivación . . . . .	7
1.3. Objetivos del proyecto . . . . .	8
1.4. Metodología de trabajo . . . . .	9
1.5. Estado de la cuestión . . . . .	12
1.6. La importancia y la razón de instalación de un biodigestor . . . . .	14
1.7. Las distintas alternativas del biodigestor . . . . .	15
<b>2. Contribución del biodigestor para alcanzar los ODS</b>	<b>19</b>
2.1. ¿Qué son los ODS? . . . . .	19
2.2. Contribución del biodigestor en Kazai a los ODS . . . . .	21
<b>3. Energías renovables en Zimbabwe</b>	<b>27</b>
3.1. Situación energética actual en Zimbabwe . . . . .	27
3.2. Principales tipos de energías renovables y su adaptabilidad a Zimbabwe	28
3.2.1. Energía hidroeléctrica . . . . .	28
3.2.2. Energía solar . . . . .	30
3.2.3. Energía eólica . . . . .	31
3.2.4. Energía de biomasa . . . . .	33
3.3. Opción energética seleccionada para el proyecto . . . . .	39
<b>4. El biogás y el biodigestor</b>	<b>41</b>
4.1. El biogás . . . . .	41
4.1.1. Concepto . . . . .	41
4.1.2. Digestión anaerobia . . . . .	42
4.1.3. Productos y usos del biogás . . . . .	48
4.1.4. Beneficios del biogás . . . . .	50
4.2. El biodigestor . . . . .	53

4.2.1.	Introducción . . . . .	53
4.2.2.	Biodigestores semicontinuos . . . . .	54
<b>5.</b>	<b>Diseño del biodigestor de Kazai</b>	<b>59</b>
5.1.	Diseño 1: Biodigestor de tanque vertical de agua . . . . .	59
5.1.1.	Materiales . . . . .	60
5.1.2.	Procedimiento de montaje . . . . .	61
5.1.3.	Dimensiones del biodigestor . . . . .	62
5.1.4.	Indicaciones . . . . .	63
5.2.	Diseño 2: Biodigestor semienterrado horizontal . . . . .	63
5.2.1.	Materiales . . . . .	64
5.2.2.	Procedimiento de montaje . . . . .	64
5.2.3.	Dimensiones del biodigestor . . . . .	65
5.2.4.	Indicaciones . . . . .	65
5.3.	Aspectos comunes a ambos modelos . . . . .	66
5.3.1.	Pautas conjuntas . . . . .	66
5.3.2.	Inicio y desarrollo del proceso . . . . .	66
5.4.	Resumen y comparación de los modelos . . . . .	69
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>71</b>
<b>7.</b>	<b>Plan económico</b>	<b>75</b>
7.1.	Presupuesto general . . . . .	75
7.1.1.	Diseño 1: Biodigestor de tanque vertical de agua . . . . .	75
7.1.2.	Diseño 2: Biodigestor semienterrado horizontal . . . . .	77

# Índice de figuras

1.1.	<i>Ubicación de Zimbabwe en el mapa de África . . . . .</i>	1
1.2.	<i>A la izquierda, el actual presidente Mnangagwa. A la derecha, el anterior presidente Mugabe . . . . .</i>	2
1.3.	<i>Mapa de Zimbabwe . . . . .</i>	3
1.4.	<i>Localización de Mt. Darwin, lugar de implantación del proyecto . . . . .</i>	4
1.5.	<i>A la izquierda, la sadza, plato típico del país. A la derecha, baile tradicional de Zimbabwe . . . . .</i>	5
1.6.	<i>Bandera de Zimbabwe . . . . .</i>	6
1.7.	<i>A la izquierda, el logo de CFA. A la derecha, el logo de la Fundación de Ingenieros de ICAI . . . . .</i>	6
1.8.	<i>Cronograma de la realización del trabajo . . . . .</i>	10
1.9.	<i>Diseño pulsera Project Zimbabwe 2020 . . . . .</i>	10
1.10.	<i>Diseño camiseta Project Zimbabwe 2020 . . . . .</i>	11
1.11.	<i>Sistema eléctrico de Zimbabwe . . . . .</i>	13
1.12.	<i>Breve diagrama del funcionamiento del biogás . . . . .</i>	14
1.13.	<i>Biodigestor de flujo discontinuo . . . . .</i>	15
1.14.	<i>Biodigestor de flujo continuo . . . . .</i>	16
2.1.	<i>Los Objetivos de Desarrollo Sostenible . . . . .</i>	20
2.2.	<i>Categoría Personas de los ODS . . . . .</i>	21
2.3.	<i>Categoría Planeta de los ODS . . . . .</i>	22
2.4.	<i>Categoría Prosperidad de los ODS . . . . .</i>	23
2.5.	<i>Categoría Paz de los ODS . . . . .</i>	24
2.6.	<i>Categoría Asociación de los ODS . . . . .</i>	25
3.1.	<i>Partes de una central hidroeléctrica . . . . .</i>	29
3.2.	<i>Localización de la presa de Kariba . . . . .</i>	29
3.3.	<i>Esquema del funcionamiento de la energía solar . . . . .</i>	30
3.4.	<i>Esquema del funcionamiento de la energía eólica . . . . .</i>	32
3.5.	<i>Producción de la energía de biomasa . . . . .</i>	34
3.6.	<i>Esquema de una central de biomasa . . . . .</i>	38

4.1.	<i>Esquema simplificado del biogás</i>	41
4.2.	<i>Proceso de la digestión anaerobia</i>	43
4.3.	<i>Relación del rendimiento del proceso con el valor de pH</i>	46
4.4.	<i>Relación del velocidad máxima de crecimiento de metanogénicos con la temperatura</i>	47
4.5.	<i>Ecuación de la productividad del metano</i>	48
4.6.	<i>Ecuación de la máxima generación del metano</i>	49
4.7.	<i>Productos del biogás en una granja con 10 bovinos</i>	49
4.8.	<i>Comparación del valor energético del biogás</i>	50
4.9.	<i>Esquema de un biodigestor</i>	53
4.10.	<i>Modelo Indio del biodigestor</i>	55
4.11.	<i>Modelo Chino del biodigestor</i>	56
4.12.	<i>Modelo Horizontal del biodigestor</i>	57
5.1.	<i>Diseño 1 propuesto para un biodigestor (sin enterrar)</i>	60
5.2.	<i>Diseño 2 propuesto para un biodigestor</i>	63
5.3.	<i>Ratio de carbono-nitrógeno</i>	67
5.4.	<i>Cantidad de agua requerida en la mezcla</i>	68

# Índice de tablas

3.1. <i>Métodos de conversión de la biomasa en energía . . . . .</i>	36
4.1. <i>Rendimiento del CH<sub>4</sub> para distintos componentes . . . . .</i>	44
4.2. <i>Comparación de los tipos de biodigestores . . . . .</i>	54
5.1. <i>Relación Carbono-Nitrógeno en la materia orgánica . . . . .</i>	67
5.2. <i>Relación Carbono-Nitrógeno en la materia orgánica . . . . .</i>	69
7.1. <i>Plan de presupuestos para el diseño 1 . . . . .</i>	76
7.2. <i>Plan de presupuestos para el diseño 2 . . . . .</i>	78



# Capítulo 1

## Introducción y planteamiento del proyecto

### 1.1. Introducción

#### 1.1.1. Aspectos básicos de Zimbabwe

- Política

Antigua Rodesia del Sur, Zimbabwe es un país situado al sur del continente africano que limita con Sudáfrica, al sur; Botsuana, al suroeste; Zambia, al noroeste y Mozambique, al este [1]. País caracterizado por los continuos cambios políticos que impiden el progreso de la nación, por una educación que todavía es ineficiente en las zonas rurales, por un alto número de niños huérfanos y por un sistema eléctrico y de saneamientos insuficientes para las necesidades del país.



*Figura 1.1. Ubicación de Zimbabwe en el mapa de África*

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

En 1965, Rodesia del Sur declaró su independencia; sin embargo, esta no fue reconocida ni por Gran Bretaña ni por la ONU. No fue hasta el 18 de abril de 1980 cuando, bajo el nombre de Zimbabue, por fin fue reconocido como país. Desde esta declaración como nación autosuficiente e independiente, Robert Mugabe presidió de una manera autoritaria el país; en solitario hasta 2009 y desde entonces, en coalición con el MDC (Movimiento del Cambio Democrático).

La formación política de Mugabe, ZANU-FP, obtuvo la mayoría absoluta dos meses antes de la constitución de la República de Zimbabue [2]. El por entonces primer ministro Mugabe planteó una política basada en la abolición de la legislación racista y en la reconstrucción de la economía. No obstante, al poco de comenzar su mandato fue acusado de violación de los derechos humanos y de corrupción. En 1987, adquirió también el cargo de Jefe de Estado. Y, a pesar de las continuas acusaciones por fraude electoral sistemático, salió elegido en todos los comicios hasta 2017. Una de las medidas más determinantes, que generó la mayor polémica de su mandato fue cuando, en el año 2000, reformó la constitución para poder expropiar las tierras de la minoría blanca para repartirlas entre la mayoría negra. Dichas propiedades terminaron finalmente perteneciendo a altos funcionarios cercanos a Mugabe; por lo que la reforma condujo al hundimiento de la producción agraria. En 2013, se aprobó una nueva Constitución que limita los poderes ejecutivos del presidente del país.

En 2017, se produjo uno de los hechos más importantes de la historia reciente de Zimbabue cuando Mugabe fue derrocado del poder gracias a un golpe militar. Este suceso fue liderado por su vicepresidente, Emmerson Mnangagwa, quien es el actual presidente del país tras salir elegido ese mismo año.



*Figura 1.2. A la izquierda, el actual presidente Mnangagwa. A la derecha, el anterior presidente Mugabe*

Lamentablemente, la situación económica y la crisis alimentaria que atraviesa actualmente Zimbabwe no son para nada favorables. Los principales factores a los que se atribuye esta situación son: la mala gestión económica por parte del gobierno, las trabas e impedimentos impuestos para que las organizaciones no gubernamentales extranjeras pudiesen llevar a cabo actividades de socorro, la epidemia del VIH y una sequía que sufre toda la zona sur del continente asiático.

La situación y gestión económica del país ha sido aciaga desde su independencia en 1980. Especialmente a partir de 1990, la economía se deterioró en exceso debido a la corrupción y la mala gestión política. En 2008, el país registró la mayor tasa de inflación de la historia a nivel mundial, y la ONU reflejó cómo los habitantes de Zimbabwe se encuentran entre los de peor calidad de vida a nivel mundial de acuerdo con el IDH (índice de Desarrollo Humano).

#### ■ Geografía

Como ya se ha mencionado con anterioridad, Zimbabwe es una región sin litoral que limita con Zambia, Mozambique, Botsuana y Sudáfrica. El territorio zimbabuense se esparce entre el río Sabi, al este; el Limpopo, al sureste; y el río Zambeze, al noreste. Este conjunto de ríos conforma una de las reservas de agua más importantes de África. La cordillera alta de Veld, que cruza el país desde las montañas de Inyanga, en el noreste, hasta el suroeste y que tiene una longitud de 640 kilómetros, constituye una cuarta parte del relieve del país.



Figura 1.3. Mapa de Zimbabwe

La capital del país es Harare, donde residen unos 1,6 millones de zimbabueses de los alrededor de 16 millones y medio de habitantes totales en el país. Este proyecto se va a implantar en el poblado de Kazai, Mount Darwin, en la provincia de Mashonalandia. En la región de Mt. Darwin se estiman unos 6400 habitantes.



Figura 1.4. Localización de Mt. Darwin, lugar de implantación del proyecto

- **Clima**

Zimbabue se caracteriza por tener un clima subtropical donde se distinguen dos estaciones muy diferenciadas: el invierno de junio a septiembre, coincide con la estación seca; y el verano, de octubre a marzo, se caracteriza por ser la estación lluviosa y cálida. Las precipitaciones varían desde 400 mm anuales en el suroeste hasta los 900 mm anuales en las zonas más altas. En cuanto a la vegetación, la más común es la sabana, con prados en las alturas y con baobabs o acacias en las zonas de menos precipitación.

- **Cultura**

En cuanto a la cultura, uno de los rasgos más característicos de Zimbabue son sus danzas y fiestas tradicionales. El aspecto culinario se basa principalmente en platos con una fuerte influencia del legado británico combinados con platos africanos tradicionales. El plato más típico es la sadza, que tiene como elemento principal maíz seco. La cerveza y el vino local son buenos y habituales, así como el vino sudafricano. Algunos de estos rasgos se muestran en la *Figura 1.5*. Respecto al idioma, el inglés es la lengua oficial del país, aunque solo se utilice principalmente en las ciudades, siendo más común en

zonas rurales el uso de lenguas nativas, a mencionar el shona o el ndebele.



Figura 1.5. A la izquierda, la sadza, plato típico del país. A la derecha, baile tradicional de Zimbabwe

- Religión

En el aspecto religioso, cabe destacar que en torno al 80 % de la población profesa el Cristianismo, aunque muchos de ellos tienen creencias mixtas [3]. Otros zimbabuenses son musulmanes o animistas. Estos últimos pertenecen al animismo, un pensamiento que atribuye alma y conciencia a los elementos naturales y a los seres inertes. A pesar de las creencias religiosas, especialmente cristianas, la poligamia continúa siendo una práctica común, especialmente fuera de las principales ciudades. No obstante, la mujer representa la cabeza de familia y la figura más importante en muchas ocasiones.

- Población

La esperanza de vida se encuentra en poco más de sesenta años. Además, un aspecto muy positivo es que el nivel de alfabetización es superior al 90 %. Sin embargo, esto no quita que sigan existiendo profundas grietas en la educación, la economía o la política. Por último, la bandera del país está impregnada con un gran significado histórico. Empezando con el verde, que representa la riqueza agrícola y las áreas rurales del país; seguido del amarillo, que hace referencia a la abundancia mineral de Zimbabwe; el rojo muestra la sangre derramada durante la lucha por la independencia; y, por último, el negro refleja que la mayoría de la población viene de etnias nativas africanas. A la izquierda, enmarcado en la estrella roja, aparece en amarillo el ave de Zimbabwe, emblema del país.



Figura 1.6. Bandera de Zimbabwe

### 1.1.2. Aspectos básicos del proyecto

Se han mencionado previamente algunos de los principales problemas de Zimbabwe como son la educación, el alto número de niños huérfanos o sistemas ineficientes. Este proyecto se desarrolla en paralelo con otros proyectos con el objetivo de ayudar y mejorar las condiciones de Zimbabwe. Estos proyectos se realizan en colaboración con las organizaciones no gubernamentales Child Future Africa (CFA) y la Fundación de Ingenieros de ICAI.

Child Future Africa empezó su actividad en 2006 con la edificación de una casa para acoger a niños huérfanos situada a unos diez kilómetros de Mount Darwin. Allí, los niños acuden a diario a la escuela y se encuentran rodeados de una atmósfera familiar y acogedora. También en esa comunidad, se han desarrollado proyectos relacionados con la agricultura, la gestión económica del distrito o la electricidad y energía. Por otro lado, en 2010 la Fundación de Ingenieros de ICAI se creó con el objetivo de colaborar con distintos proyectos sociales, con especial atención en ayudar a la mejora de la pobreza energética, facilitar la disponibilidad de agua potable y ayudar a la formación en España, devolviendo así un poco del aprendizaje y de los estudios adquiridos en ICAI [4].



Figura 1.7. A la izquierda, el logo de CFA. A la derecha, el logo de la Fundación de Ingenieros de ICAI

Además del diseño e implantación de un biodigestor, este año, en colaboración con las dos ONGs, se van a llevar a cabo proyectos relacionados con la instalación solar para bloques de aulas en colegios de formación, la definición y construcción de una zona común abierta para formación corta mediante workshops, la fabricación de un edificio para albergar varias consultas de asistencia básica, la instalación de una piscifactoría para incrementar ingresos y mejorar la calidad de vida local o la definición de un sistema de regadío para optimizar el consumo y maximizar la productividad. Todos estos proyectos se realizan con el objetivo de que sean sostenibles, ya que esa es una de las claves para que realmente ayuden al país a desarrollarse y mejorar.

La idea inicial consiste en una primera parte donde cada alumno se centra en la definición, desarrollo y estudio de su proyecto; en una segunda donde este verano se va durante seis semanas a Zimbabue a ponerlo en práctica e implantarlo; y, finalmente, a una tercera fase consistente en describir y analizar la experiencia así como ofrecer conclusiones globales. No obstante, con la situación actual debida al COVID-19, tristemente no es posible ir este verano a Zimbabue para poder implantar los proyectos. Aun así, los proyectos se podrán implantar si no más adelante, cuando todo vuelva a la normalidad, ya que esa es la principal meta: ayudar al distrito de Mount Darwin.

## 1.2. Motivación

La principal motivación del proyecto para el autor del mismo ha venido dada por varios factores. En primer lugar, el hecho de que sea un Trabajo de Fin de Grado con carácter social y que, además, tenga la opción de poder ir a implantarlo en el lugar, no solo quedándose en un proyecto, fue una razón de peso que encajaba bastante con los valores del autor. La posibilidad de que este trabajo vaya más allá de un alumno sentado frente a un ordenador leyendo y trabajando horas y horas supone un factor muy seductor, especialmente para un ingeniero.

Otra razón fue el hecho de contar con un trabajo que realmente supusiera un reto en el que poder aplicar distintos conceptos aprendidos a lo largo de la carrera, que fuera algo distinto, exigente y bonito. Un trabajo en el que el autor pueda desarrollar con cierta libertad sus ideas, ver si realmente son aplicables y, si no, poder corregirlas. Así, el autor puede sentir que el proyecto es suyo y que no ha hecho simplemente un proyecto que ya estaba determinado. Esto, además, supone también devolver un poco de todo lo que la carrera le ha aportado, así como devolver a los padres del mismo un poco de todo el esfuerzo y confianza que siempre

han depositado en él.

Asimismo, tras haber hecho un estudio de la situación actual de Zimbabue en todas sus caras y ver que ninguna de ellas presenta un futuro a corto plazo muy esperanzador, el autor del escrito se vio con la obligación moral de intentar ayudar y aportar lo que pudiese para revertir la situación y ayudar a un país con muchos recursos.

El hecho que el autor del trabajo venga de un pequeño pueblo de España, algo que puede parecer sin importancia para la mayoría, fue un factor de motivación, ya que el proyecto está pensado para ser implantando en una zona rural de Zimbabue que no cuenta con los recursos y facilidades de las zonas urbanas. Salvando las diferencias entre los países, el autor se siente identificado y agraciado por el hecho de poder ayudar al desarrollo de un pequeño distrito y ver como sus habitantes aprenden a utilizar los nuevos recursos, cosa que ayudará a que poco a poco vayan aumentando sus conocimiento y cultura.

Por último, un factor quizá con algo menos de peso, pero sin dejar de ser importante, es el de poder mostrar la realidad de Zimbabue y Mt. Darwin a la sociedad española para poder concienciar así a más gente. Dentro de toda la sociedad, al autor le motiva en especial mostrarlo en el ambiente de nuestra universidad, UP Comillas, ya que nos podemos considerar unos privilegiados porque nuestros padres nos puedan ofrecer esta educación. Además, generalmente los estudiantes de esta universidad llevan una vida muy cómoda, sin grandes preocupaciones económicas y, a veces, con excesos innecesarios. Así, si se muestra la realidad de Kazai, igual da lugar a que la gente se plantee un poco cómo vivir y cómo, con un pequeño cambio, se puede ayudar mucho a gente que de verdad lo necesita. Este factor de motivación no es una crítica hacia nadie ni va dirigido personalmente a nadie, es simplemente un hecho que de verdad constituye un factor de motivación para el autor y no quería dejar de compartirlo.

### **1.3. Objetivos del proyecto**

Este proyecto, como se ha mencionado con anterioridad, tiene dos metas principales: generar fertilizante que se pueda emplear luego en campos de cultivo y biogás para la combustión, especialmente para cocinar. Con estos dos objetivos vienen otros tantos de la mano como son:

- Determinar la opción más eficiente, sostenible y económica para desarrollar

el biodigestor, teniendo en cuenta que también tiene que ser accesible y fácil de utilizar por los locales

- Recaudación de fondos necesarios para llevar a cabo los proyectos
- Realización de los cálculos y medidas necesarias para el diseño del biodigestor
- Estudio y elección de los materiales disponibles y necesarios para la construcción del equipo
- Implantación del biodigestor

## 1.4. Metodología de trabajo

La metodología a emplear, presentada de manera muy general, sería: estudio y realización del proyecto escrito, implantación del proyecto en Zimbabue y posterior análisis de resultado y conclusiones. Sin embargo, este año 2020 estamos pasando por una situación un tanto insólita, una pandemia mundial que ha paralizado la economía y el movimiento de personas y bienes, entre muchas otras cosas. Esta pandemia ha provocado que, en un principio, surgiera la incertidumbre de saber si este verano se iban a poder implantar los proyectos o no, para finalmente confirmar la mala noticia y saber que no va a ser posible, al menos, este verano. Como los proyectos están pensados para que se puedan implantar en un futuro, se va a plantear la metodología de trabajo teniendo en cuenta que los proyectos se vayan a llevar a cabo, ya que se espera que tarde o temprano así sea.

En primer lugar, se llevará a cabo un estudio del contexto del proyecto; es decir, de Zimbabue y en particular del distrito de Mount Darwin, así como de las distintas alternativas de un biodigestor y del biogás. A continuación, se realizará el grueso del proyecto escogiendo la alternativa más apropiada y realizando los cálculos y estudios necesarios para que después sea viable su implementación. En tercer lugar, es el turno para ir a Zimbabue y realizar la implantación del proyecto, ajustando las medidas teóricas a la vida real para que sea posible. Por último, se realizará un análisis de la experiencia de la implantación para ver si los cálculos iniciales terminaron cerca o no de la realidad y se plantearán las conclusiones a las que haya llegado el autor.

■ Cronograma

A continuación, se va a presentar un cronograma de cómo se va a realizar el proyecto, especificando los tiempos dedicados a cada sección del trabajo.

Sección	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Investigación y recopilación de información	■							
Anexo B			■					
Desarrollo del proyecto y de los cálculos mecánicos				■				
Selección de materiales				■				
Revisión del presupuesto					■			
Revisión de los cálculos finales					■			
Revisión de la viabilidad de otras alternativas						■		
Revisión General						■		
Implementación del proyecto							■	

Figura 1.8. Cronograma de la realización del trabajo

■ Presupuesto y plan económico

En este trabajo se van a proponer dos opciones de diseño del biodigestor. La primera, basada en el modelo chino, es un tanque de agua vertical y tiene un presupuesto de 400-500 USD. La segunda es el modelo horizontal de biodigestor semicontinuo y tiene un presupuesto mucho menor, de entre 120-170 USD.

El plan económico de este trabajo está incluido en el de todos los proyectos que realizan conjuntamente CFA y la Fundación de Ingenieros de ICAI, de manera que entre todos los alumnos a cargo, se llevan a cabo actividades e iniciativas para recaudar dinero para financiar así todos los proyectos que luego se implantarán en Zimbabue, ya que de manera conjunta se consigue obtener muchos más fondos. Se tenían previstas y organizadas muchas actividades pero, por la situación del COVID-19, solo se han podido llevar a cabo unas pocas. No obstante, se van a enumerar aquí todas las que se tenían pensadas inicialmente y se especifica si se han podido realizar o no:

- Diseño y venta de pulseras (sí que se empezó la venta de pulseras, pero se vio interrumpida por el virus). Aquí se muestra el diseño:



Figura 1.9. Diseño pulsera Project Zimbabwe 2020

- Organización de dos fiestas durante el segundo cuatrimestre y de la fiesta de graduación en junio (solo se pudo realizar una de ellas).
- Mercadillos solidarios en la universidad y fuera de ella (no se han podido realizar).
- Diseño y venta de camisetas (sí que se empezó la venta de camisetas, pero se vio interrumpida por el virus). Aquí se muestra el diseño:



Figura 1.10. Diseño camiseta Project Zimbabwe 2020

- Financiación por parte de empresas (no se llegó a cerrar ningún acuerdo).
- Donaciones particulares colocando huchas en distintos lugares de la universidad como reprografía o cafetería y, fuera de la universidad, donde cada alumno pudiese (algunas de ellas ya habían recaudado ciertas cantidades).
- Torneos deportivos solidarios (no se llegaron a realizar).

La recaudación de todos estos fondos se donará igualmente a CFA y se guardará para cuando se pueda acudir a Zimbabwe a implantar los proyectos.

■ Plan de mantenimiento

Una vez ya instalado el biodigestor, cabe determinar la carga diaria y el mantenimiento. Este aspecto y la protección de la instalación son imprescindibles, ya que de ellos depende la vida útil del aparato.

En primer lugar, es fundamental alimentarlo a diario siempre con las mismas medidas y cantidades de materia orgánica y con la misma proporción entre esta y el agua. Si se hace correctamente, se generará la cantidad de gas deseada.

El otro gran aspecto es la protección, ya que el biodigestor puede sufrir mucho tanto con las lluvias y el sol, como con las acciones de los animales. Contra la actividad de los animales, se recomienda vallar o cercar la instalación para evitar el acceso a ella. En cuanto al clima, el diseño vertical no sufre mucho al estar plenamente enterrado, pero, para el diseño semienterrado horizontal, es aconsejable construir un techo protector para minimizar los efectos de los rayos del sol y de las lluvias.

## **1.5. Estado de la cuestión**

Este trabajo en concreto se centra en el diseño y la implantación de un biodigestor para la comunidad rural de Kazai, Mt. Darwin, Zimbabue. Este proyecto pretende generar fertilizante para los campos de cultivo y biogás para combustión, especialmente orientado para que se pueda usar para cocinar. Los avances que introducirá el biodigestor provocarán mejoras contribuyendo especialmente a la agricultura y la situación energética. Más adelante, se realizará un análisis más profundo sobre estos aspectos en la zona, así como del biogás.

Se calcula que sobre un 70 % de los zimbabuenses trabajan en el sector agrícola. El cual, a pesar de la sequía de 2015 donde sufrió una reducción de la producción, tiene mucho peso, ya que representa casi la mitad de las exportaciones de Zimbabue. Dentro de la agricultura, el tabaco constituye el cultivo más potente y con mayor cantidad exportada.

El sector energético está compuesto principalmente por centrales térmicas de carbón que constituyen en torno al 60 % de toda la energía del país. Lo restante proviene casi todo de centrales hidroeléctricas. Debido a la sequía sufrida en el sur de África tras el 2015 y a los cada vez más bajos niveles de carbón en las minas del país, se ha ocasionado una considerable reducción de la producción de energía por parte de las centrales tanto térmicas como hidroeléctricas. Otro problema al que se enfrenta Zimbabue es que no se muestra capaz de aumentar su capacidad de generación de energía, ya que no se ha llevado a cabo ningún desarrollo relacionado con este tema desde finales de la década de 1980. Esto ha dado lugar a que, lamentablemente, solo esté disponible en torno al 60 % de la capacidad de energía instalada.

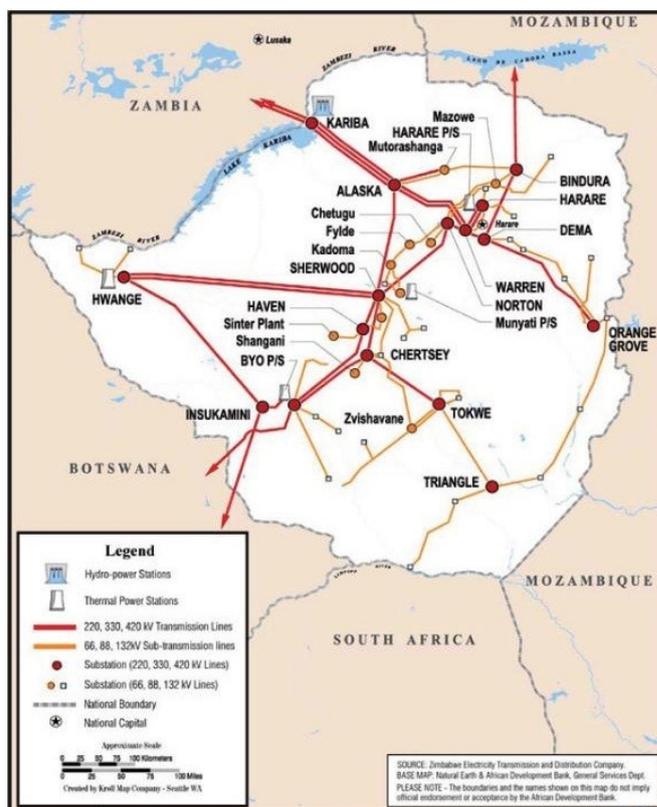


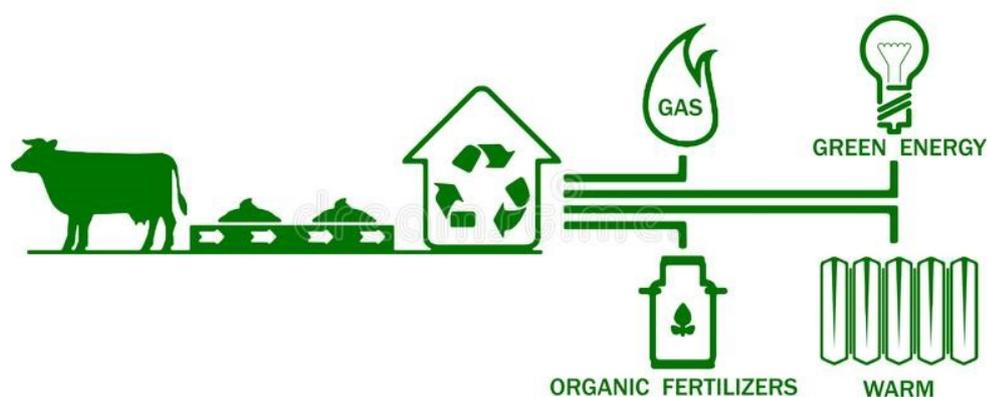
Figura 1.11. Sistema eléctrico de Zimbabwe

El problema va más allá cuando se conoce que todas las centrales del país sufren parones periódicos, lo que provoca que se produzcan continuos cortes de energía que imposibilitan un adecuado empeño de los servicios y de las industrias del país. Por otro lado, se reciben importaciones de las centrales eléctricas de los países cercanos, pero sigue sin ser suficiente. Como parche para esta situación, es muy común el uso de pequeños generadores de energía.

La principal empresa encargada del sistema eléctrico de Zimbabwe es ZESA (Zimbabwe Electricity Supply Authority Holdings), que se encarga de la distribución y administración de la energía y hace poco ha decretado un racionamiento de la misma en el país, lo que significa que las zonas rurales van a sufrir más para mantener si quiera la cantidad de energía recibida hasta el momento. Asimismo, esta misma empresa ha asegurado que la situación va a empeorar en los próximos años. En cuanto a Kazai, lugar donde se va a desarrollar este proyecto, el problema es incluso más grave, ya que no se prevé ningún suministro de electricidad en la

región a medio plazo, por lo que se están considerando otras fuentes para generar energía donde el biogás podría ser una de ellas, adquiriendo un gran protagonismo en la escena.

El biogás es una técnica de producción de energía que ha pasado por épocas buenas y malas. Actualmente, con la constante reducción de la cantidad de carbón y otros combustibles fósiles, el biogás está otra vez al alza. Cuenta como principales ventajas con la posibilidad de autogeneración, la facilidad para ser almacenado comparado con otros métodos, y la comodidad que resulta su uso y consumo, aspecto muy importante para países subdesarrollados. Además, el biogás es una energía renovable, ya que proviene de biomasa y de residuos orgánicos.



*Figura 1.12. Breve diagrama del funcionamiento del biogás*

## **1.6. La importancia y la razón de instalación de un biodigestor**

En primer lugar, se quiere recalcar la razón de necesidad y las verdaderas implicaciones que tiene el biodigestor. En muchas zonas de África y también en Zimbabue, las aguas y acuíferos se contaminan por los residuos y desechos de las letrinas y por las heces de los animales. El biodigestor plantea una solución para estos residuos, ya que se pueden emplear como la materia orgánica con la que se alimenta el biodigestor, evitando que se ensucien las aguas y reduciendo las

enfermedades en las mismas.

Otro problema al que el biodigestor da una solución es a la deforestación. Esta se produce debido a que la leña es la única manera con la que muchas zonas rurales pueden generar energía. De esta manera, si el biodigestor les proporciona una dosis diaria de biogás se evitaría la masiva recogida de leña.

Otra implicación que tiene el biodigestor y que tiene mucha perspectiva de futuro es que la implantación de estos aparatos puede introducir en la zona un nuevo tipo de negocio, produciendo valor añadido, como la creación de nuevos empleos de mayor calidad.

## 1.7. Las distintas alternativas del biodigestor

Se va a estudiar qué diseño de biodigestor es el más apropiado para la instalación en Kazai teniendo en cuenta los recursos disponibles y las capacidades de las personas de allí. Por ello, primero se van a presentar los distintos tipos de biodigestores y sus características. A continuación se muestran los tres principales tipos [5].

Por un lado se encuentran los biodigestores de **tipo discontinuo**. Estos se caracterizan por que al inicio se hace ya la carga de toda la materia a procesar, cuya fermentación dura entre dos y cuatro meses. Este tipo de biodigestores son más adecuados para un uso industrial o grupal más que para un solo hogar ya que requieren mayor trabajo que los otros tipos a la hora de carga, un espacio amplio para la almacenamiento de la materia y, de un depósito de gas grande, ya que la producción de gas varía considerablemente durante la fermentación. Una ventaja de los biodigestores discontinuos es que aceptan materiales secos como el pasto, los desechos de otros alimentos o las cáscaras de frutas; materias que no se pueden emplear con el biodigestor continuo.



*Figura 1.13. Biodigestor de flujo discontinuo*

El segundo tipo de biodigestor es el de **flujo semicontinuo**. En este caso, la carga y descarga se llevan a cabo de manera periódica o continúa a lo largo de la fermentación, la cual nunca se detiene. En comparación con el biodigestor de flujo discontinuo, los semicontinuos necesitan menor mano de obra, pero requieren materiales más fluidos. Suelen requerir también un depósito de gas y son adecuados para instalaciones más pequeñas. Asimismo, necesitan de una mayor atención para el mantenimiento. Dentro de los biodigestores de flujo semicontinuo hay varios tipos. Los tres principales son el de cúpula fija (chino), el de cúpula flotante (hindú) y el de estructura flexible (los de bajo costo). Se analizarán estos tres tipos con mayor profundidad más adelante en el trabajo.

Por último, se encuentran los biodigestores de **flujo continuo**, que se suelen ser grandes de tamaño industrial y normalmente se utilizan para tratar aguas residuales. Este tipo suele producir una mayor cantidad de biogás. Entre los biodigestores continuos hay distintos sistemas; los principales son el sistema de desplazamiento horizontal, el de tanques múltiples y el de tanque vertical.



*Figura 1.14. Biodigestor de flujo continuo*

Una vez vistos los tipos de biodigestores, se van a mostrar las soluciones tecnológicas ya existentes al problema planteado, centrándose en que tienen que poder ser instaladas en pequeñas aldeas en zonas rurales sin muchos recursos y con presupuestos limitados. Esto excluye alternativas que podrían parecer obvias como las plantas de energía solar o eólica, ya que requieren de una gran inversión inicial. Por tanto, las principales alternativas reales para solucionar el problema son:

- Modelo Chino del biodigestor semicontinuo. Es quizá la alternativa menos económica, pero la más duradera.
- Modelo Indio del biodigestor semicontinuo. Alternativa que contiene variantes sencillas y baratas para que puedan ser instaladas prácticamente en cualquier lugar.

- Modelo horizontal del biodigestor semicontinuo. Tiene mayor capacidad de almacenamiento y producción que las otras opciones y su coste es muy bajo.

Para el proyecto que aquí se presenta, se va a utilizar una de estas alternativas del biodigestor semicontinuo que, como ya se ha recalado, se analizarán con profundidad en el trabajo y se determinará la o las opciones más viables.

*CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO*

---

## Capítulo 2

# Contribución del biodigestor para alcanzar los ODS

### 2.1. ¿Qué son los ODS?

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son unas metas universales que tienen como fin erradicar la pobreza, preservar el planeta y asegurar la paz y prosperidad a todas las personas para 2030 [6]. Estos objetivos fueron adoptados por todos los Estados pertenecientes a la ONU en 2015, pero fueron ya gestados anteriormente en 2012 en Brasil en la Conferencia de la ONU sobre el Desarrollo Sostenible.

En el año 2000, se aprobaron los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), que tenían similares fines que los ODS. Gracias a los ODM, se gestaron importantes avances en asentar la educación primaria en todo el mundo y en la disminución de la pobreza y de la sed mundial, en el descenso de la mortalidad infantil y en la lucha contra enfermedades como el VIH, la malaria o la tuberculosis. Tras quince años persiguiendo los ODM, se decidió que era necesario un paso más en el camino hacia conseguir estos fines y se decidieron adoptar los ODS, que constituyen un acuerdo decidido para abordar y finalizar los retos más necesarios a los que nos enfrentamos hoy en día.

Los ODS, también llamados Objetivos Mundiales, son claves, ya que involucran problemas que nos atañen a todos y su aprobación supone la afirmación y el compromiso de todos para decididamente erradicar la pobreza. Los 17 ODS están integrados entre sí, lo que supone que los avances en uno de ellos afecta a los otros, de manera que en el progreso se consigue de forma sostenible, ya que la interrelación de los objetivos hace de su desarrollo un balance entre la economía, el medio

## CAPÍTULO 2. CONTRIBUCIÓN DEL BIODIGESTOR PARA ALCANZAR LOS ODS

ambiente y el ámbito social.

Algunos datos claves que reflejan la importancia y eficacia de los ODS y de otros objetivos de la ONU son que desde 1990: la mortalidad infantil es menor de la mitad, que más del 50 % de los niños que antes no tenían acceso a la educación ahora sí que tienen acceso, que más de mil millones de personas ya no están en estado extremo de pobreza, y que, desde el año 2000 han disminuido en un 40 % las infecciones por el SIDA.

El acuerdo de 2015 consta de 17 objetivos y 169 metas. A continuación, se va a analizar como el biodigestor contribuye a cada uno de los diecisiete objetivos en el marco de la aldea de Kazai en Zimababue.



Figura 2.1. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible

## 2.2. Contribución del biodigestor en Kazai a los ODS

Para proceder a este análisis vamos a dividir los diecisiete objetivos en cinco categorías para que sea más coherente y sencillo. Dichas categorías son: Personas, Planeta, Prosperidad, Paz y Asociaciones. Se va observar el hecho mencionado anteriormente de que los objetivos están relacionados y más aún entre los de una misma categoría, por lo que el motivo que contribuye a mejorar un objetivo, muchas veces será parecido a la razón de mejora de otros objetivos.

- Personas



Figura 2.2. Categoría Personas de los ODS

Estos cinco objetivos están enfocados en el marco de la persona. El primer objetivo atañe a un aspecto sobre el que se puede trabajar y mejorar mucho en la comunidad de Mt. Darwin en Zimbabwe: el biodigestor contribuye a poner fin a la pobreza evitando que las pequeñas comunidades rurales dependan de otros municipios para conseguir energía y abasteciéndolos con un suministro de energía mínimo para satisfacer necesidades básicas. En cuanto al objetivo de hambre cero, el biodigestor producirá además de biogás, un buen fertilizante que se podrá utilizar para mejorar los cultivos y mejorar así las cosechas, pudiendo recoger una mayor cantidad de alimentos y de mayor calidad y consiguiendo, además, una agricultura autosuficiente para la aldea.

## CAPÍTULO 2. CONTRIBUCIÓN DEL BIODIGESTOR PARA ALCANZAR LOS ODS

---

Esto está directamente relacionado con el siguiente objetivo, donde el biodigestor no solo provocará que haya una mejor comida sino que, gracias al biogás, también evitará que las mujeres y los niños tengan que desplazarse a por leña, lo cual mejorará su calidad de vida y permitirá que los jóvenes dediquen mayor tiempo a su educación y formación, aportando así al cuarto objetivo. También facilitará que las mujeres tengan tiempo para dedicarse a otras actividades de mayor repercusión, contribuyendo de esta manera a la igualdad de género.

- Planeta



*Figura 2.3. Categoría Planeta de los ODS*

Ahora se examinará la categoría Planeta empezando por el sexto objetivo, el cual es uno sobre los que el biodigestor tiene un mayor impacto, ya que dicho sistema necesita de los residuos para poder llevar a cabo la fermentación, facilitando así una solución para estos residuos y mejorando el saneamiento. Este hecho escrito así igual no parece tan trascendente, pero un problema muy común en África es que las personas, y en especial los niños, defecan y miccionan en el mismo agua del que luego beben y utilizan para otras labores de higiene, provocando que cojan muchas enfermedades que llevan a la mortalidad infantil. Por tanto, si se facilita un sitio donde las personas pueden ir a hacer sus necesidades para que ya no se mezclen con el agua, se evitará que cojan enfermedades a través de este medio. Asimismo, el uso de un biodigestor requiere responsabilidad y compromiso para aprovechar al

máximo todos los recursos, en especial los residuos, para conseguir que sea un sistema sostenible y eficiente. Esto fomenta una producción y consumos consecuentes, acorde con lo que dicta el duodécimo objetivo. Por otro lado, el biodigestor reduce también el efecto de los gases invernadero generados por los residuos al ser estos usados para la fermentación, aportando así al principio 13 y combatiendo también el cambio climático. Esto contribuye a ayudar a conservar otros aspectos de la naturaleza como mares, océanos y sus especies, o como los bosques y ecosistemas terrestres, ayudando así a lo que sostienen los principios 14 y 15. Otro hecho que atañe directamente al principio 15 es el de parar la deforestación, al conseguir que ya no se necesite leña.

### ■ Prosperidad



Figura 2.4. Categoría Prosperidad de los ODS

En el apartado de Prosperidad nos encontramos con el séptimo principio que aboga por una energía sostenible y no contaminante. El biogás es un tipo de energía renovable y el biodigestor un sistema que proveerá energía de manera autosuficiente a Kazai, lo que encaja a la perfección con lo establecido en dicho principio. El biodigestor trae consigo un crecimiento económico, ya que genera energía de una forma muy barata permitiendo invertir en otros aspectos que mejoren la vida de las personas locales y gracias al fertilizante, se obtendrán mejores cultivos, lo que llevará a una mayor recaudación de dinero. El noveno objetivo dicta que hay que promover infraestructuras

## CAPÍTULO 2. CONTRIBUCIÓN DEL BIODIGESTOR PARA ALCANZAR LOS ODS

---

resilientes y una industrialización inclusiva y sostenible fomentando la innovación; el biodigestor contribuye a este hecho, ya que en el medio rural la instalación de un biodigestor supone un gran cambio industrial que además es sostenible e inclusivo. Gracias al abastecimiento de energía a zonas rurales que proporciona el biodigestor, se reducen poco a poco las desigualdades entre distintos medios y países, participando así con el objetivo número 10. El número 11 defiende las comunidades autosuficientes y sostenibles, factor al que el biodigestor contribuye haciendo el municipio en el que se instala más independiente sin romper el compromiso con el medio ambiente.

- Paz



*Figura 2.5. Categoría Paz de los ODS*

Por último, como ya se ha explicado, el biodigestor contribuye a mejorar la sociedad de la comunidad en la que se instale, en este caso en Kazai, lo que debe llevar a reducir las desigualdades consiguiendo así sociedades más justas, sólidas y en paz.

- Asociación



*Figura 2.6. Categoría Asociación de los ODS*

En relación con el objetivo anterior, si se consigue un mundo igualitario, sería posible llegar a acuerdos equilibrados entre comunidades para seguir luchando por conseguir los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

*CAPÍTULO 2. CONTRIBUCIÓN DEL BIODIGESTOR PARA ALCANZAR  
LOS ODS*

---

# Capítulo 3

## Energías renovables en Zimbabwe

### 3.1. Situación energética actual en Zimbabwe

Como ya se ha comentado en el estado de la cuestión del Capítulo 1, el biodigestor produce energía a través de la técnica renovable del biogás, lo que permitirá que la comunidad de Kazai pueda tener autogeneración de energía principalmente para cocinar, pero también para iluminar y calentar los hogares.

Insistiendo un poco en la contextualización de la situación de la generación y uso de energía en Zimbabwe, las centrales térmicas (energía no renovable) suponen un 60 % de la producción y el otro 40 % viene principalmente de las centrales hidroeléctricas (energía renovable). No obstante, la cada vez más abundante escasez de carbón y las sequías hacen que la producción del país sea muy limitada. Asimismo, la ya mencionada empresa ZESA, al cargo del sistema energético de Zimbabwe, ha comunicado que la situación no va a mejorar en un futuro próximo y que la importación de energía de centrales eléctricas de países vecinos no es suficiente, por lo que ha decretado una racionalización de la energía por la cual las zonas rurales se ven verdaderamente damnificadas.

Asimismo, la población del país continúa aumentando y se desarrolla sin que se haya evolucionado en la infraestructura energética para poder satisfacer la creciente demanda. Además, no solo no se ha invertido en esto, sino que las centrales ya existentes cada vez sufren más parones de suministro. Por tanto, es muy interesante ayudar a la población local a ser autónoma y autosuficiente energéticamente, ya que no se espera que la situación vaya a cambiar por parte del gobierno y el biodigestor es una de las soluciones más factibles para combatir la escasez de energía.

Por otro lado, enfocándose más en la zona que atañe al proyecto, Mt. Darwin,

la situación es muy poco halagadora al ser una pequeña zona rural alejada de grandes zonas urbanas, por lo que se ve más perjudicada con todos los problemas actuales. De ahí que las zonas rurales tengan que buscar parches e innovar para solucionar esta situación. Por esto motivo, este proyecto es fundamental por el hecho de que produciría rápidas mejoras en la región.

## **3.2. Principales tipos de energías renovables y su adaptabilidad a Zimbabwe**

### **3.2.1. Energía hidroeléctrica**

Previamente a describir el funcionamiento de una central hidroeléctrica, es necesario explicar los distintos modelos de centrales hidroeléctricas.

En primer lugar, si decidimos clasificar de acuerdo con cómo se encuentra el agua en las centrales, estas pueden ser de dos tipos: de agua fluyente, donde se utiliza la propia inercia del agua para producir la energía, o de embalse, donde el agua está en reposo y se utilizan cilindros de alta presión para fabricar la electricidad. Este último tipo es más costosa pero también más rentable, ya que produce mucha mayor cantidad de energía. Otro criterio válido para clasificar la centrales hidroeléctricas es teniendo en cuenta con qué altura cae el agua. Se consideran de alta presión cuando la altura de caída es de 200 metros o más, siendo el mínimo de altura 4 metros. Por último, existen las centrales mareomotrices, las cuales utilizan las mareas y las olas para producir energía; sin embargo, este tipo no es muy común ya que son muy costosas de precio, construcción y mantenimiento en comparación con la cantidad de generación de energía.

Para analizar las partes de una central hidroeléctrica se va centrar en las de embalse. En la siguiente figura se observa como este tipo de centrales constan de un embalse donde el agua está retenida, de ahí el agua pasa a la tubería forzada que conduce el agua hasta turbina. Por causa del movimiento rotacional, el agua alcanza su máxima velocidad al llegar a la turbina y, con el movimiento de la turbina, se transfiere energía al generador y al transformador donde se obtiene energía eléctrica lista para el consumo, que es transportada por medio de la línea de transporte.

### 3.2. Principales tipos de energías renovables y su adaptabilidad a Zimbabue

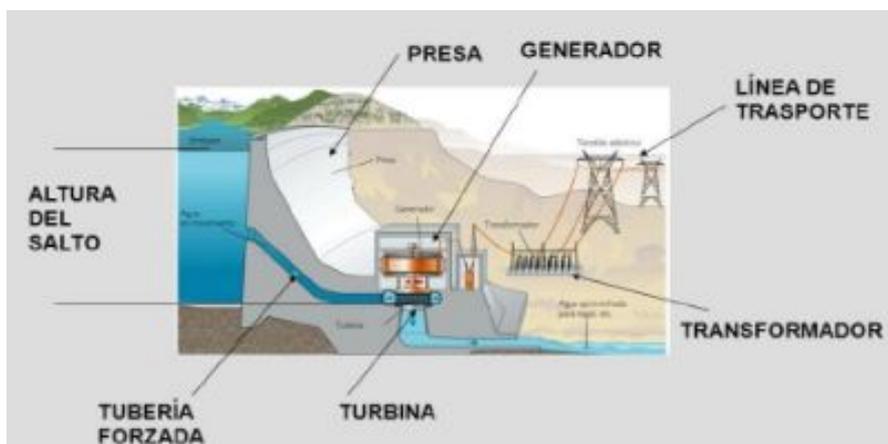


Figura 3.1. Partes de una central hidroeléctrica

El futuro de las centrales hidroeléctricas existentes no es muy alentador, ya que muchas de ellas están al borde de su vida útil. Asimismo, uno de los principales argumentos en contra de dichas centrales es que alteran el clima y el paisaje que los rodea, lo que provoca el desplazamiento de comunidades o inundaciones. Por tanto, el futuro de estas centrales está marcado por un uso de las mismas más sostenible, maduro y estable.

Ahora se va a enfocar la atención en este tipo de generación de energía en Zimbabue, donde hay una central hidroeléctrica, la presa de Kariba. Esta presa es una de las más grandes del mundo y está localizada entre Zambia y Zimbabue en el cauce del río Zambeze [7].



Figura 3.2. Localización de la presa de Kariba

La presa de Kariba fue construida en dos etapas, de 1955 a 1959 y una segunda, que terminó en 1977. El embalse tiene una capacidad de  $180 \text{ km}^3$  y la presa unas dimensiones de 579 metros de largura y 128 de altura. Para visualizar la capacidad de esta embalse, los de la península ibérica embalsan menos de un tercio que dicha presa. La central genera anualmente 6400 PJ ( $1\text{PJ}=10^{15}\text{J}$ ) y produce 1266 MW de electricidad para ambos países.

Para poder contruir la presa, se desalojó a más de 57000 personas de tribus locales de sus lugares de origen y fueron dirigidos a lugares con condiciones mucho peores. Asimismo, desde la construcción de la central se han registrado numerosos terremotos en la zona, veinte de los cuales fueron mayores de 5 en la escala de Richter. Estas polémicas, unidas a la alteración del paisaje, al coste millonario de su construcción, a los continuos problemas de funcionamiento y la insuficiente capacidad para abastecer a Zimbabwe hacen que la central de Kariba esté sumida en una gran polémica. De ahí que otras formas de energía renovable tengan una gran oportunidad para crecer y asentarse en el país.

#### 3.2.2. Energía solar

La energía solar es una de las energías renovables más conocidas y, de la que se espera, que termine suplantando a las formas de generación de energía no renovable. El funcionamiento de la energía solar consiste en que las placas solares fotovoltaicas captan los fotones que emite el sol separando los electrones de los átomos. El circuito eléctrico que está en las placas está compuesto por conductores conectados a los bornes positivos y negativos de la célula. De esta manera, la electricidad se genera en el momento en que dichos electrones comienzan a circular por el recorrido del circuito. Además, los paneles se pueden conectar entre sí generando una mayor cantidad de energía. Tras los paneles, la energía pasa por un regulador y un inversor para convertirla en energía eléctrica útil [8].

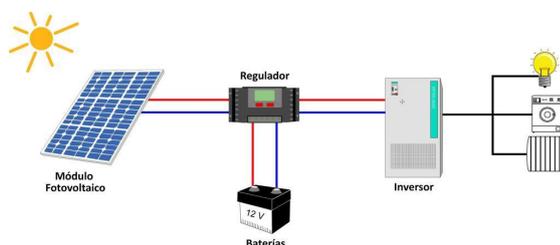


Figura 3.3. Esquema del funcionamiento de la energía solar

### 3.2. Principales tipos de energías renovables y su adaptabilidad a Zimbabwe

---

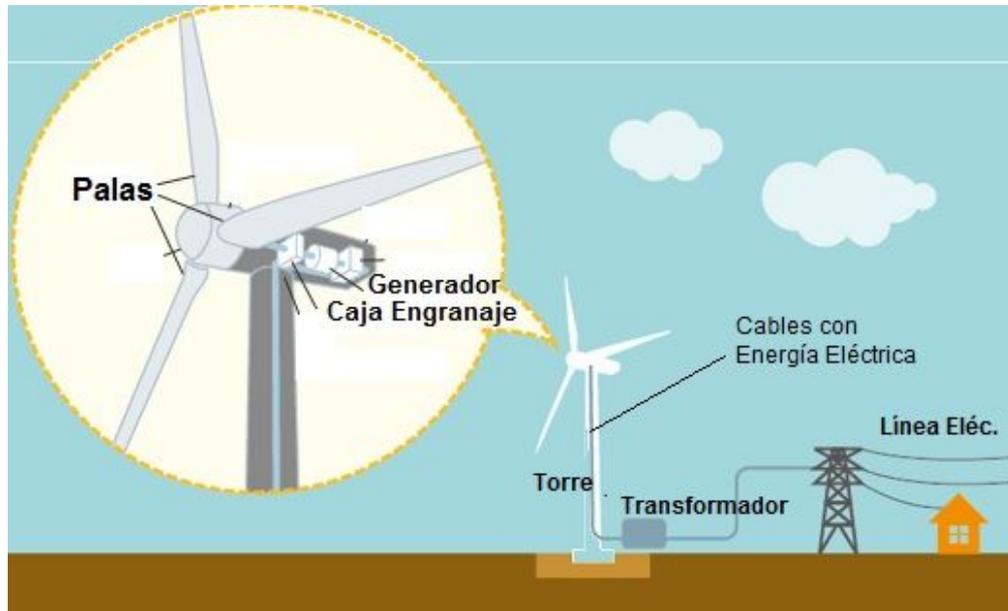
Este tipo de energía tiene grandes y sólidas ventajas entre las que destacan:

- Es limpia e inagotable
- Su precio es cada vez más bajo
- El combustible necesario para este tipo de energía tiene coste cero
- Tiene más de una utilidad. Además de para generar energía eléctrica también sirve para producir energía termal
- No necesita de un gran mantenimiento

En cuanto a la situación de esta energía en Zimbabwe. La solar ha sido una de las apuestas para solventar el problema de la falta de energía eléctrica en el país. El clima en el mismo es muy soleado y consta de una irradiación óptima para las placas fotovoltaicas. Se ha aprobado la implantación de distintas plantas solares que añadirán energía a la red nacional. Asimismo, otras empresas extranjeras privadas también han apostado por invertir en energía solar en Zimbabwe [9].

#### 3.2.3. Energía eólica

La energía eólica es otra de las formas de energía renovable fundamentales en la transición del modelo energético. Esta energía es una energía cinética que funciona gracias al viento. Su funcionamiento empieza con las palas moviéndose gracias a las corrientes de aire y, con dicho giro, el aerogenerador, gracias a una turbina, genera electricidad. Después, la energía eléctrica se transporta a través de una línea eléctrica para su uso [10].



*Figura 3.4. Esquema del funcionamiento de la energía eólica*

Las principales ventajas de esta energía se listan a continuación:

- Es limpia e inagotable
- Su precio es cada vez más bajo
- Requiere menor espacio que la energía solar
- Es compatible con labores agrícolas y ganaderas

Entre sus principales desventajas es que el viento no es una fuente asegurada, que no se puede almacenar, que perjudica a los pájaros y aves y que rompe con el paisaje.

Tradicionalmente, en Zimbabwe la energía eólica no ha sido muy explotada. Los recientes problemas de generación y suministro de energía, obligan a ZESA a incluir este tipo de energía como una de las alternativas. IRENA (la Agencia Internacional de Energía Renovable) llevó a cabo un estudio del que se concluía que en el país hay regiones óptimas para la instalación de parques eólicos, como lo son las zonas de Eastern H., Great Dyke y Matabeleland St. Otro factor que puede ayudar a impulsar esta energía es que países cercanos como Sudáfrica ya

tienen parques de este tipo de energía que están produciendo aportaciones esenciales. La otra cara de la moneda, es que no es fácil ni rápido conseguir autorización para implantar los proyectos de eólica, pero esto se puede aliviar y acelerar si se consiguen inversiones significantes, factor en el que tiene que trabajar también el gobierno [11].

### 3.2.4. Energía de biomasa

Este tipo de energía es sobre la que se centra el trabajo, por lo que se realizará un estudio más profundo de la misma.

- **Qué es la energía de biomasa?**

La energía de biomasa es la energía renovable que utiliza la materia orgánica para generar energía. Por materia orgánica se entiende toda sustancia residual proveniente de los seres vivos, como animales, humanos o plantas, y sus restos. Esta energía viene originalmente del sol, ya que los seres la reciben del sol, la absorben y la reservan, la cual la transforma principalmente en energía y comida. Asimismo, también se generan productos derivados de este proceso que no son aprovechables por animales, plantas o seres humanos, pero sí que pueden ser utilizados para generar energía. De esta manera, la producción de energía a través de la biomasa es un proceso ecológico y sostenible [12].

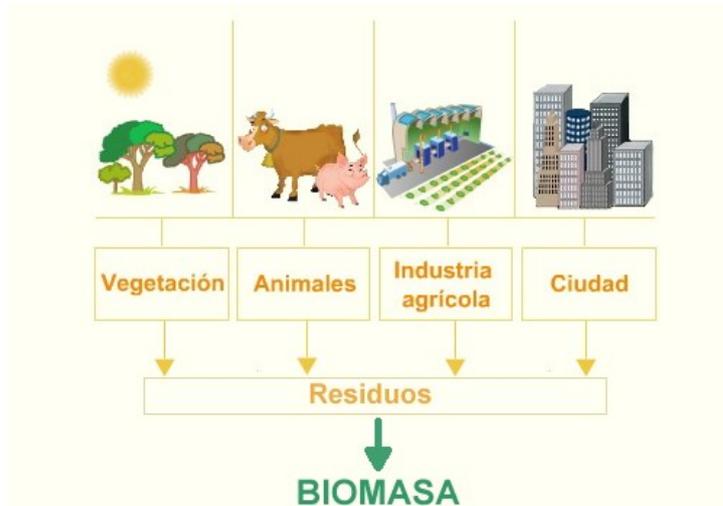


Figura 3.5. Producción de la energía de biomasa

#### ■ Tipos de biomasa

Existen tres principales grupos de biomasa:

- Biomasa natural: es aquella que se genera en la naturaleza, los subproductos que se forman con mucho poder energético donde el ser humano no ha intervenido.
- Biomasa residual: es aquella que se produce a partir de los restos orgánicos que vienen de los seres humanos como paja, huesos, cáscaras, residuos urbanos, residuos ganaderos, etc.
- Biomasa producida: también llamado cultivos energéticos, son plantaciones de cultivo con el único objetivo de ser usado para aprovechar su energía.

Otra clasificación que se puede hacer de la biomasa, es de acuerdo con la proporción de agua que tiene:

- Biomasa húmeda: es aquella que tiene su origen en aprovechar los residuos de aceites.
- Biomasa seca: son aquellos residuos sólidos que no son usados en la agricultura ni en alimentación, como lo son la cáscara de frutos secos,

### 3.2. Principales tipos de energías renovables y su adaptabilidad a Zimbabue

---

los restos de algunas poda, serrín, etc.

#### ■ **Ventajas y desventajas**

Las principales ventajas son [13]:

- Coste muy bajo en comparación con otros métodos más comunes.
- Es una fuente no contaminante y sostenible.
- Contribuye a la limpieza del medio ambiente, ayudando entre otras cosas a reducir en riesgo de incendios en bosques.
- Da una utilidad a los residuos de las industrias.
- La biomasa acepta una gran diversidad de combustibles.

Por otro lado, los principales inconvenientes son:

- El rendimiento de este tipo de generación de energía es menor que el de los combustibles fósiles.
- Necesita de métodos de almacenamiento más grandes, ya que su densidad energética es más pequeña.
- Tiene problemas y costes añadidos, como el tratamiento y limpieza de las cenizas tras la combustión.

#### ■ **Métodos de producción de energía**

Se muestran en la siguiente tabla [14]:

### Termoquímicos

<i>Método</i>	<i>Descripción</i>
Combustión	Se produce cuando, a una temperatura elevada (más de 600°C), se queman los residuos con mucho aire. Es el sistema más elemental en el que se generan gases utilizados en uso doméstico, industrial o para generar energía eléctrica.
Pirólisis	En este método también se quema la biomasa, pero sin oxígeno, obteniéndose gases compuestos de hidrógeno y carbón vegetal entre otras cosas.
Gasificación	En este proceso existe una combustión con oxígeno resultando distintos gases en cantidades variantes. Hay dos tipos de gasificación, el gasógeno y el gas de síntesis (de gran utilidad, ya que de este se puede obtener metanol o gasolina).
Co-combustión	No es un método muy puro de biomasa, pero también existe. Se usa de combustible para las calderas de carbón de biomasa. Así, se disminuyen las emisiones y la cantidad de carbón necesaria para la combustión.

### Bioquímicos

<i>Método</i>	<i>Descripción</i>
Fermentación alcohólica	Es fundamentalmente la fermentación del carbón de las plantas de donde se extrae etanol que luego se emplea para uso industrial.
Fermentación metánica	Consiste en la digestión anaerobia, es decir, sin oxígeno, de los residuos. Aquí la biomasa se descompone en el proceso de fermentación y se genera el biogás. Este es el método que se va usar en este proyecto en el biodigestor.

Tabla 3.1. Métodos de conversión de la biomasa en energía

#### ■ Explotación de la biomasa

Ya se han presentado los distintos sistemas para la obtención de energía. Por tanto, ahora se va a analizar los diferentes tipos de energía que se pueden producir con la biomasa:

- Energía térmica: es quizá la energía más común que se produce con biomasa. Es a través de combustión directa y su uso es principalmente

### 3.2. Principales tipos de energías renovables y su adaptabilidad a Zimbabwe

---

para proveer calor para cocinar, para producir vapor o electricidad, o para secar productos agrícolas.

- Biogás: con la fermentación se obtiene metano, que tiene una gran utilidad para dar calor y, por tanto, tiene aplicaciones parecidas a la anterior.
- Biocombustibles: presentan una opción más sostenible que los combustibles tradicionales y tienen una gran capacidad de crecimiento por delante. Hay dos principales tipos: el bioetanol, que sirve como combustible para métodos de transporte, y el biodiesel, que sustituye al gasoil.
- Energía eléctrica: es otra de las aplicaciones de la biomasa y, si se reúne una considerable cantidad de residuos, se pueden generar interesantes medidas de electricidad.

#### ■ Las centrales de biomasa

En estas instalaciones se utiliza materia orgánica para generar electricidad. El funcionamiento de estas centrales está bien estudiado para sacar el mayor rendimiento a los residuos. En primer lugar, se almacena el combustible y los residuos en la central, que luego pasa a una estancia específica para preparar y clasificar la materia [15].

El agua circula desde el tanque de alimentación, donde es previamente calentada con los gases de la combustión, hasta las tuberías de la caldera. Cuando el agua circula por estos conductos, por el calor pasa a convertirse en vapor de agua.

El siguiente paso es común para muchas instalaciones térmicas, el vapor de agua asciende hasta la turbina, la cual está conectada al generador donde se transforma y se genera la electricidad que después se transporta por las líneas.

Por último, en el condensador el vapor pasa de nuevo a estado líquido que es conducido otra vez al tanque de alimentación completando el circuito cerrado.

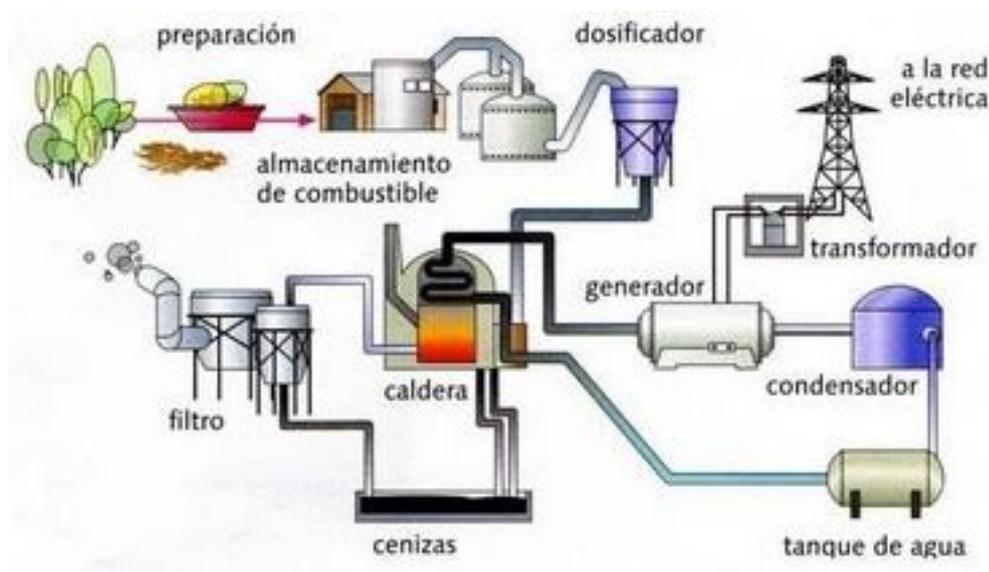


Figura 3.6. Esquema de una central de biomasa

■ **El impacto de la biomasa en el medio ambiente**

Una gran controversia que rodea a la biomasa es si realmente es sostenible y renovable, ya que en el proceso de combustión se libera mucho CO<sub>2</sub>. No obstante, este proceso de obtención de energía puede presentar un balance positivo de CO<sub>2</sub> si la transformación de los residuos se desarrolla de manera sostenible. Esto se consigue cuando dejamos que la materia orgánica se regenere a un ritmo más rápido que el ritmo de consumo de la misma, ya que así se logra que el recurso absorba más CO<sub>2</sub> en su desarrollo del dióxido de carbono que se emite durante la combustión.

En la Tierra hay ahora mismo un potencial energético abundante y suficiente para satisfacer las exigencias de demanda energética. Sin embargo, si se usa todo este potencial, el consumo sería mayor que la regeneración y ya no haría de la biomasa un sistema sostenible y renovable, provocando además efectos como la deforestación. Por tanto, la biomasa es una gran alternativa que ayuda al medio ambiente **siempre y cuando se emplee de manera responsable**.

■ **Situación de la biomasa en Zimbabwe**

En Zimbabwe actualmente no existe ninguna central eléctrica de biomasa, pero eso no quiere decir que la biomasa no esté presente en el país. Este tipo de energía tiene su importancia especialmente en las zonas rurales. Como ya

se ha mencionado, los biodigestores y las calderas de biomasa se utilizan en poblaciones rurales para asegurar el suministro de energía debido a las deficiencias del sistema eléctrico. Esta es la aplicación más común de la biomasa en Zimbabwe, un ejemplo de ello es la instalación el verano de 2019 de un biodigestor en la comunidad rural de Nowetza, situado en las proximidades de Dotito al noreste de Zimbabwe. Dicho biodigestor fue también implantado con la colaboración de Child Future Africa y la Fundación de Ingenieros de ICAI y ha servido de inspiración para este proyecto ya que se asemeja mucho al mismo y la comunidad de Kazai no dista mucha de Nowetza.

### **3.3. Opción energética seleccionada para el proyecto**

La energía de biomasa es la opción que se va a utilizar en este proyecto, ya que es la que usa el biodigestor. Esta no es quizá la alternativa renovable más popular pero, como se ha explicado, es una energía con mucha historia y suficientemente desarrollada para ser sólida y consistente. Asimismo, a través de los biodigestores, la biomasa es una forma muy económica y sencilla de generar energía.



# Capítulo 4

## El biogás y el biodigestor

### 4.1. El biogás

#### 4.1.1. Concepto

El biogás es un gas combustible que se genera debido a la degradación en ausencia de oxígeno de los residuos orgánicos o biomasa. El proceso de descomposición en ausencia de  $O_2$  se denomina digestión anaerobia y es clave para la obtención del biogás.

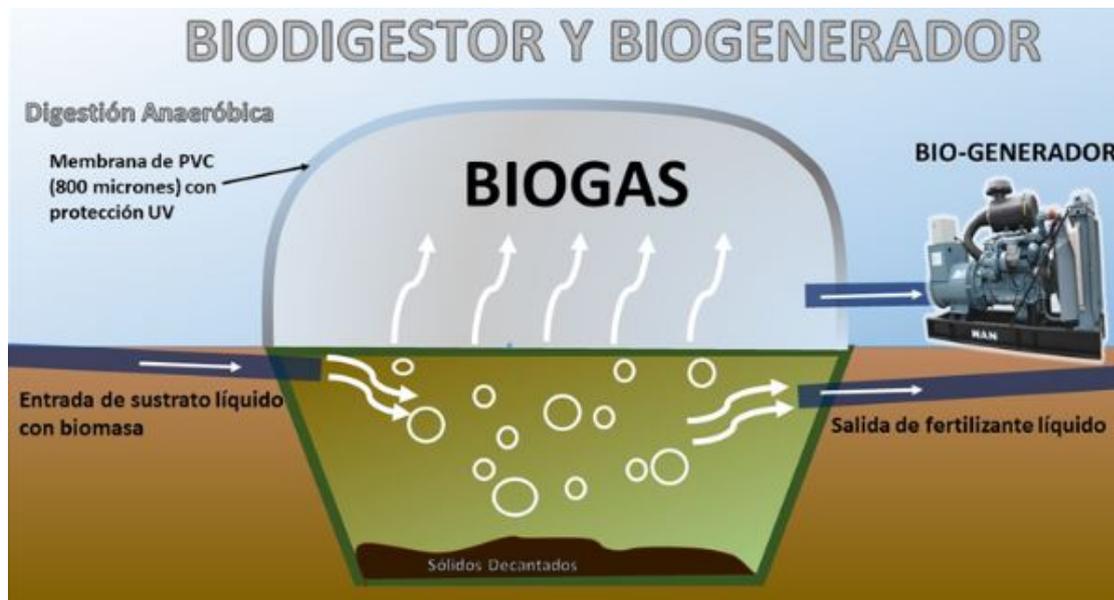


Figura 4.1. Esquema simplificado del biogás

El biogás es a día de hoy una de las alternativas más sólidas que la gente utiliza en la transición energética. Este gas está compuesto mayoritariamente por metano  $\text{CH}_4$ , y el resto por dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ . Existen otros compuestos en cantidades mucho menores que pueden ser útiles o no dependiendo del uso que se quiera dar al biogás [16].

### 4.1.2. Digestión anaerobia

#### 1. Introducción

La digestión anaerobia es un proceso que se lleva a cabo de manera natural en el medio ambiente donde la materia orgánica se descompone sin ninguna presencia de oxígeno. Este proceso tiene sus inicios cuando el químico y físico italiano Alessandro Volta halló en 1776, que al degradar compuestos orgánicos en ausencia de oxígeno, se producía un gas con grandes porcentajes de  $\text{CH}_4$ . Otros importantes personajes en el desarrollo de este proceso surgieron en el siglo XIX como Beauchamp, que decretó la existencia de microorganismos en la digestión anaerobia, o Pasteur que propuso el uso de este gas para iluminar las farolas y estudió la generación de biogás utilizando residuos provenientes de seres vivos. En el siglo veinte, el biogás y la digestión anaerobia perdieron popularidad debido a la facilidad de uso de las materias fósiles y formas de energía no renovables [17]. No obstante, estas últimas décadas este proceso vuelve a estar en auge, ya que se buscan formas de generar energía más sostenibles y esta técnica es energéticamente favorable.

#### 2. Fases del proceso

El proceso biológico de la digestión anaerobia produce principalmente  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . Para llegar hasta ese punto el procedimiento consta de varias etapas, las cuales se muestran a continuación [18]:

- **Hidrólisis:** esta es la primera fase del proceso en la que los compuestos orgánicos (lípidos, proteínas y carbohidratos) son despolimerizados en compuestos solubles fácilmente degradables como los azúcares, ácidos grasos de cadena larga, alcoholes y aminoácidos. Para lograr esta despolimerización, la materia orgánica traspasa un muro celular donde intervienen agentes hidrolíticos (enzimas extracelulares), los cuales transforman los materiales orgánicos en moléculas solubles orgánicas. Esto provoca que mejore

características de la materia como la solubilidad y la viscosidad, ayudando así a la descomposición de la sustancia en las siguientes etapas y reduciendo la duración del proceso. Esta fase es muy delicada, ya que elementos externos pueden alterar el proceso como el pH, la composición del sustrato o la temperatura. Estos factores se analizarán con mayor profundidad más adelante.

- **Acidogénesis:** es donde se produce la transformación de las moléculas solubles en ácidos de cadena por la actuación de las bacterias acidogénicas. Estos ácidos de cadena corta como el ácido acético, el butírico o el propiónico son posteriormente aprovechables en la fase de metanogénesis.

- **Acetogénesis:** en esta etapa se utilizan los compuestos que no han sido convertidos por las bacterias. Estos compuestos intermedios (ácidos grasos, etano, etc.) son transformados en compuestos más simples como el ácido acético, el  $\text{CO}_2$  o el  $\text{H}_2$ .

- **Metanogénesis:** por último, las bacterias metanogénicas convierten los compuestos resultantes de la segunda y tercera fase en metano y dióxido de carbono. El  $\text{CH}_4$ , que constituye en torno al 70 % del gas final, viene de la descarboxilación del ácido acético.

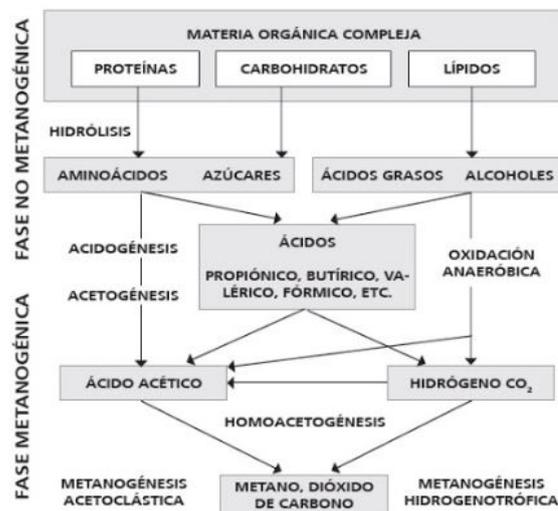


Figura 4.2. Proceso de la digestión anaerobia

3. Factores que afectan la digestión anaerobia

Existen varios factores biológicos, físicos y químicos que son determinantes en la eficiencia del proceso. De estos factores depende la cantidad de metano producida, la duración de la digestión y la calidad de la misma. A continuación se explican los principales factores que serán fundamentales a la hora de la implantación del biodigestor.

a) *Composición residual*

Dependiendo de si los sustratos son orgánicos o inorgánicos, la biodegradación varía. El componente residual que más favorece el proceso son los residuos orgánicos húmedos. Esto es debido a que esta materia no tiene metales pesados o residuos contaminantes. Asimismo, si la composición cuenta con un mayor número de sustratos beneficiosos, se generan más AGV (ácidos grasos volátiles) y el rendimiento de metano termina siendo mejor.

En la tabla de debajo, se presenta la productividad del  $CH_4$  para distintos sustratos. Para ello, se muestra el porcentaje final de metano en el biogás y los kilogramos de SV (sólidos volátiles) descompuestos, es decir, solo aquellos SV que generarán el gas final.

<i>Sustrato</i>	<i>Porcentaje de metano</i>	<i>m<sup>3</sup>/kg de SV destruido</i>
Carbohidratos	50	0,89
Grasas	70	1,34
Proteínas	84	0,59

*Tabla 4.1. Rendimiento del  $CH_4$  para distintos componentes*

b) *Balance de nutrientes*

Se pueden encontrar distintos resultados acerca del adecuado balance entre los nutrientes. La relación de C:N:P que vincula las cantidades de carbono, nitrógeno y fósforo es recomendable que esté en torno a 400:7:1, lo que significa que es aconsejable que el balance sea rico en fósforo y, en menor medida, en nitrógeno, aspecto recomendable y a tener en cuenta. Una cuantía precisa de fósforo y nitrógeno ayuda a acelerar y promover la digestión anaerobia; sin embargo, un exceso de

nitrógeno, por ejemplo, podría inhibir el proceso, por lo que hay que tener mucho cuidado y ser muy preciso si realmente se quiere favorecer el desarrollo bacteriano. Por otro lado, la agregación de grasas vegetales incrementa considerablemente el rendimiento del biogás.

c) *Inhibidores de la producción del biogás*

Existe una serie de compuestos que reducen significativamente la productividad del proceso y la cantidad de biogás producido. Entre estas sustancias destacan el amonio libre, los surfactantes, pesticidas o fenoles.

d) *Cantidad de sólidos y separación de los mismos*

En un biodigestor semicontinuo, que es el que se diseña en este proyecto, se aconseja que la cantidad total de sólidos en la mezcla esté entre el 8 % y el 12 %. Como este hecho es difícil de conseguir, ya que generalmente la materia orgánica tiene un mayor porcentaje de sólidos, se añade más agua para alcanzar así una proporción adecuada. Por otro lado, se recomienda también llevar a cabo una separación de la arena y de los plásticos, así como una disminución del tamaño de los residuos sólidos en piezas inferiores a 40mm para conseguir un mejor flujo.

e) *Separación de las etapas de la digestión anaerobia*

Una separación de las cuatro fases del proceso permite ajustar mejor el pH y la temperatura de cada etapa optimizando así el proceso. De la misma manera, se pueden ir agregando diferentes componentes en las distintas fases que ayuden a mejorar cada una de ellas. Este factor mejora el proceso pero no es tan determinante como otros, ya que en casi todas las plantas de biogás se apuesta por no separar las etapas pues es más económico y más fácil de montar y mantener.

f) *Demanda Biológica del Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno*

La DBO y la DQO son indicadores del oxígeno requerido para la degradación y, por tanto, nos muestran indirectamente la proporción de materia orgánica presente. Este+os indicadores están vinculados con la carga diaria, esta relación se explica en el siguiente factor. De esta manera, estos son mecanismos que nos ayudan a conocer el estado de la mezcla para poder así actuar de manera consecuente.

g) *Carga diaria*

La cantidad diaria de mezcla que se agrega al biodigestor debe ser examinada, debido a que un exceso de adición puede provocar que la fermentación no se termine y se genere menos cantidad de biogás. La DBO y DQO nos ayudan a saber cuanta materia orgánica añadir, así, por ejemplo, si se necesitan mayores niveles de ácidos, entonces se añadirá mayor cantidad de materia orgánica. El tiempo de retención es el periodo que va desde la primera carga hasta que empieza a generarse el biogás. Esta duración varía mucho según el clima, siendo alrededor de 30 días en regiones cálidas y en torno a 75 en zonas más gélidas.

h) *Efecto del pH*

Los enzimas de los organismos ven afectada su actividad por el pH de la mezcla, ya sea variando el grupo hidrolizable o modificando los sustratos no enzimáticos. En la digestión anaerobia lo óptimo es un pH neutro, es decir, con un valor de 7. Distanciarse de ese valor supone una reducción del rendimiento del proceso, aun así se ha demostrado que existe un rango en el que la digestión no sufre inhibición, dicho rango se muestra en la siguiente figura.

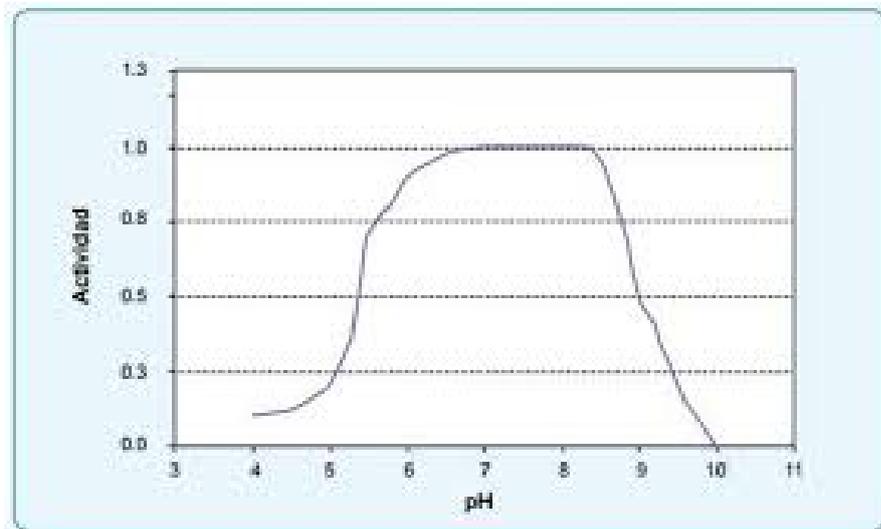


Figura 4.3. Relación del rendimiento del proceso con el valor de pH

Para asegurarse que no se sale de este rango y que la mezcla se encuentra siempre en un pH que favorece la producción de biogás, es recomendable tomar medida del pH diariamente.

i) *Temperatura*

El rango de temperatura en el que se puede llevar a cabo la digestión anaerobia es muy amplio, por lo que es un factor muy a tener en cuenta y muy influyente. Las bacterias metanogénicas se ven altamente afectadas por los cambios de temperatura, ya que su ritmo de desarrollo es menor que el del resto de componentes, a mayor temperatura se generan más microorganismos y se aumenta la velocidad del proceso. Un descenso importante de la temperatura podría retrasar la generación de  $\text{CH}_4$ , aglomerando muchos ácidos pudiendo producir un fallo en el biodigestor. Así, es recomendable crear y conservar un clima cálido dentro del aparato. Una táctica para conseguir esto consiste en cubrir el biodigestor con plástico de invernadero. Para no alterar el proceso es aconsejable que no se produzcan cambios mayores de un grado y medio en la materia.

En la siguiente figura se muestra la relación entre la tasa de crecimiento de metanogénicos con respecto a la temperatura. Para ello se ha dividido en tres rangos la temperatura: en el psicofílico son temperaturas menores a  $35^\circ$  y su rendimiento óptimo está en  $15-18^\circ\text{C}$ . El mesofílico son temperaturas entre los treinta y los cuarenta y el óptimo está entre  $33-38^\circ\text{C}$ . Por último, en el termofílico están entre los cuarenta y los sesenta y cinco grados con el rendimiento óptimo entre  $55-60^\circ\text{C}$ . Por encima de los  $65^\circ\text{C}$  el proceso empieza a sufrir una considerable bajada en su rendimiento.

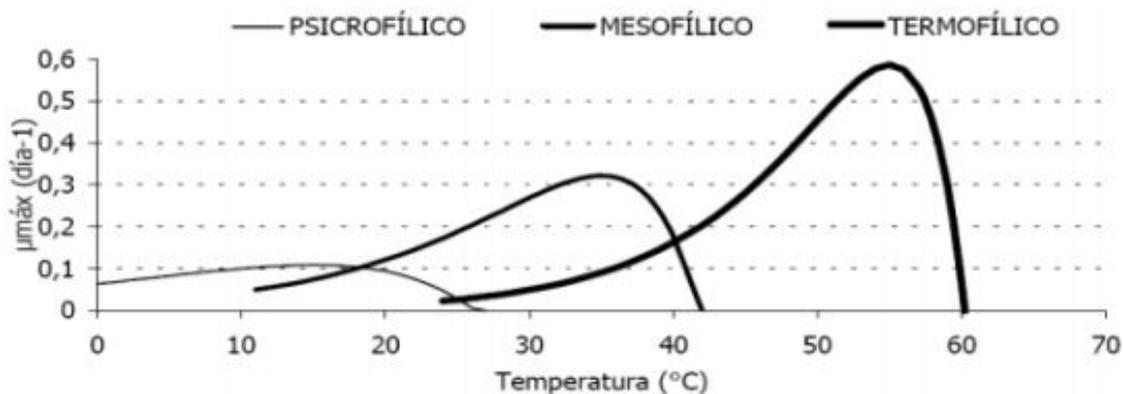


Figura 4.4. Relación de la velocidad máxima de crecimiento de metanogénicos con la temperatura

*j) Sistema de agitación durante el proceso*

Es recomendable que exista algún método de sacudida de la materia orgánica y del agua. Esto es porque así se remueven los sustratos, se evita que se forme una costra en la superficie y se consigue una mezcla uniforme. Todo ello llevará a una mejora de la digestión anaerobia y se puede conseguir a través de procesos como la agitación manual o por medio de un motor, la sacudida mediante bombas de agua o la generación de burbujas generadas por la circulación del gas que remuevan la mezcla.

### 4.1.3. Productos y usos del biogás

Del proceso de generación del biogás se obtienen dos principales productos: el propio biogás y el digestato. El principal componente del biogás es el metano, el cual determina la mayoría de las aplicaciones. Por tanto, es importante calcular la productividad y la máxima generación del mismo. La productividad viene dada por [19]:

$$P_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{V_{reactor} * t}$$

*Figura 4.5. Ecuación de la productividad del metano*

Donde:

- $V_{CH_4}$ : volumen de  $CH_4$  producido
- $V_{reactor}$ : volumen de toda la sustancia del biodigestor
- $t$ : tiempo considerado en el que se quiere calcular la productividad

Por otro lado, la fórmula que estima la producción máxima de  $\text{CH}_4$  es:

$$M_{\text{máx}} = \frac{V_{\text{CH}_4}}{Q_{\text{ot}}}$$

Figura 4.6. Ecuación de la máxima generación del metano

Donde  $Q_{\text{ot}}$  hace referencia a la cantidad de materia orgánica total empleada en la digestión anaerobia.

El digestato, también llamado lodo digerido, es el fertilizante resultante que tiene un gran valor energético y es uno de los objetivos por los que se construye el biodigestor de este trabajo. Este efluente tiene gran importancia, ya que mejora las cosechas y la calidad del terreno.

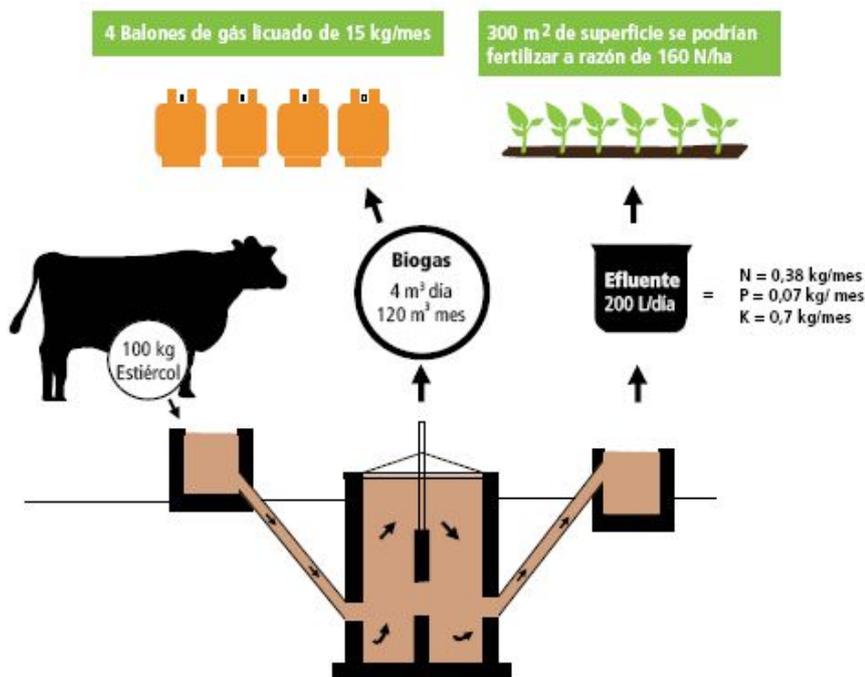


Figura 4.7. Productos del biogás en una granja con 10 bovinos

## CAPÍTULO 4. EL BIOGÁS Y EL BIODIGESTOR

Las principales funciones que se le pueden dar al biogás son:

- La generación de calor cuando la combustión se produce de manera directa. Dando lugar a su utilización como gas para cocinar, una de las funciones del trabajo, para sistemas de calefacción o para calderas. En regiones rurales este suele ser el principal fin del biogás y del biodigestor.

- El biogás también se puede utilizar para producir energía eléctrica, como ya se ha mencionado con anterioridad. Esto se hace a través de ciclos combinados y una turbina, que es girado gracias al gas.

- Uno de los usos más recientes de este gas es su empleo como combustible de vehículos. Para poder dar este uso, primero se tiene que separar el  $\text{CH}_4$  y es este biometano el que se utiliza para propulsar coches y autobuses en la actualidad.

- Otra aplicación es hacer funcionar lámparas y farolas por medio de quemadores de biogás. Una tradicional lámpara de gas con una leve modificación puede ser empleada para ser iluminada por biogás.

Para apreciar el valor energético del biogás se muestra a continuación una figura en la que se compara este gas, con una composición de 60 % de  $\text{CH}_4$  y 40 % de  $\text{CO}_2$ , con otras formas de energía.

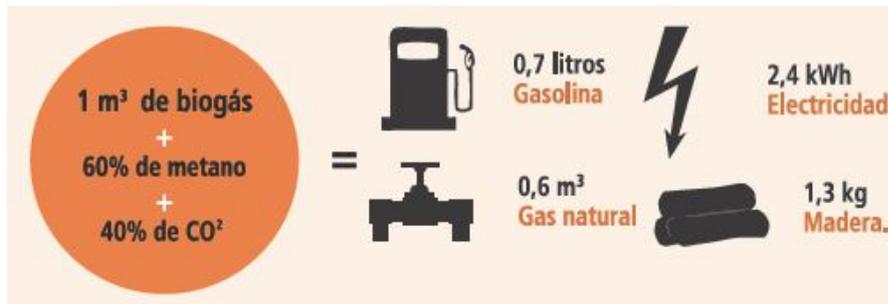
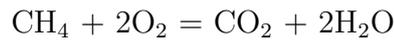


Figura 4.8. Comparación del valor energético del biogás

### 4.1.4. Beneficios del biogás

Entre los beneficios del biogás destaca que, gracias a este gas y a su proceso de generación, se puede controlar el metano. Este hecho es muy importante, ya que el metano no es solo uno de los gases más contaminantes que favorece el efecto

invernadero y destruye la capa de ozono, sino que además es hasta veintiún veces más perjudicial que el dióxido de carbono. El metano no solo se controla cuando se genera y cuando el biogás se almacena. También tras la combustión de este, el  $\text{CH}_4$  pasa a ser dióxido de carbono y agua:



Otro beneficio de este proceso con respecto al metano es que, al recoger la heces de los bovinos, se evita que se libere el metano al medio ambiente al verter estos residuos en el biodigestor.

Una ventaja más que concierne a este proceso e influye directamente al proyecto de Kazai es el hecho de que, gracias a la energía generada por el biodigestor, se va a evitar que las mujeres y los niños tengan que recorrer largas distancias a diario para recoger leña y, así, poder producir la energía necesaria. Esto mejorará la calidad de vida de las personas locales y también ayudará a frenar la deforestación que sufren muchas regiones en África, ya que la madera es la única fuente para producir energía en muchos lugares.

Por otro lado, los gastos necesarios para generar este gas son muy bajos y tampoco tiene altos costes de mantenimiento. Asimismo, la materia orgánica que se puede utilizar para producirlo proviene de muy diversas fuentes, lo cual es muy ventajoso, ya que, si en alguna ocasión hay escasez de las materias más comunes, se pueden utilizar otros residuos orgánicos como sustituto.

Como se ha podido comprobar, el biogás se puede generar hasta en los lugares más remotos, ya que no requiere de plantas de producción complejas como otras forma de energía. Esto lo hace asentarse como la mejor alternativa de energía en medios rurales con pocos recursos. Además, otra utilidad es que, a diferencia de otras energías donde su producción se limita puramente a la generación de energía, el biogás trae consigo más que calor y energía eléctrica: también produce fertilizante de calidad para los cultivos y representa una solución para los residuos y excrementos.

Por último, la implantación de un biodigestor en una comunidad rural y la producción de biogás, como ya se ha comentado en el primer capítulo, supone la creación de empleo de mayor de calidad que los empleos agrícolas y también conlleva mayores beneficios para la zona, lo que finalmente se traduce en una mejora de las condiciones y ayuda al desarrollo y la igualdad. De esta manera, el hecho de que las comunidades dispongan de biogás supone que ya son autosuficientes

## *CAPÍTULO 4. EL BIOGÁS Y EL BIODIGESTOR*

---

energéticamente y no dependen de los pobres sistemas de suministro del gobierno.

## 4.2. El biodigestor

### 4.2.1. Introducción



Figura 4.9. Esquema de un biodigestor

El primer biodigestor real fue construido en 1890 en la India, esto explica la influencia de este país en este aparato. La construcción de este primer biodigestor no fue una innovación, sino que fue más una necesidad por las personas que vivían en el medio rural para tener una forma autosuficiente de generación de energía. Seis años más tarde, aparece uno de los datos más curiosos, ya que toda la iluminación pública de la ciudad de Exeter en Reino Unido, estaba producida por el biogás recogido de los biodigestores que recolectaban los residuos de la cloacas del municipio.

Ya en el siglo veinte fue cuando se fabricó el primer tanque digestor (1920, Alemania). En la siguiente decena, en China se promovió la instalación de biodigestores en regiones rurales para suplir de energía a los hogares. A mitad de siglo, nuevamente en India se diseñan modelos más simplificados para la fermentación

con el objetivo de generar biogás y fertilizante, estos son los primeros modelos muy similares a los actuales biodigestores de los medios rurales. Más adelante, en Asia y la parte sur de África se han ido instalando biodigestores en comunidades rurales hasta la actualidad.

En la introducción del trabajo se han explicado los tres principales tipos de biodigestor y se concluyó que el que se va a emplear en este proyecto es un biodigestor semicontinuo. Para recordar brevemente estos tipos y sus principales características se presentan a continuación:

<i>Tipo</i>	<i>Momento de la carga</i>	<i>Duración del proceso</i>	<i>Uso</i>
Discontinuo	Solo al inicio	2-4 meses	Usar cuando la materia orgánica es limitada o intermitente. Acepta materiales secos
Semicontinuo	La carga se realiza periódicamente	Nunca se detiene	Adecuados para instalaciones pequeñas. Requieren de materiales más fluidos
Continuo	Se recarga continuamente	Nunca se detiene	Se utilizan para tratar aguas residuales

*Tabla 4.2. Comparación de los tipos de biodigestores*

### 4.2.2. Biodigestores semicontinuos

Ahora se va estudiar con mayor detenimiento los biodigestores semicontinuos analizando los distintos tipos y sus características. Este tipo de biodigestor se suele recargar al menos una vez por día. Para mantener el volumen de materia en la cámara de carga constante es importante que se retire el mismo volumen de digestato que de la carga depositada. Estos biodigestores cuentan con la ventaja de que siempre están generando biogás, pero para ello requieren agua constantemente y esto puede suponer un problema si en la zona donde se instala hay limitaciones de la misma. La proporción entre la materia orgánica y el agua suele ser, que por cada porción de materia, corresponden cuatro de agua (1:4). A continuación se muestran los tipos de biodigestores discontinuos [20].

### Biodigestor semicontinuo de mezcla completa

Se caracterizan porque la materia añadida diariamente se mezcla completamente con el contenido ya existente en la cámara. Este sistema se encuentra con el problema de que en el efluente hay también material que no ha llevado a cabo el proceso de la digestión anaerobia, y esto hace que el fertilizante pierda pureza y ciertas propiedades.

- **Diseño Indio**

A este modelo se le denomina también como Modelo de Domo Flotante, debido a que en la parte superficial se encuentra una campana flotante normalmente hecha de plásticos reforzados o metal. Esta campana retiene el biogás dentro de la cámara y se adapta al volumen ascendiendo y descendiendo, guiada por una varilla en el centro. Una de las principales razones por la que se apostó por este diseño es que, gracias al domo, la presión se mantiene casi constante, lo que es muy beneficioso para controlar el proceso y que siempre se desarrolle de manera semejante.

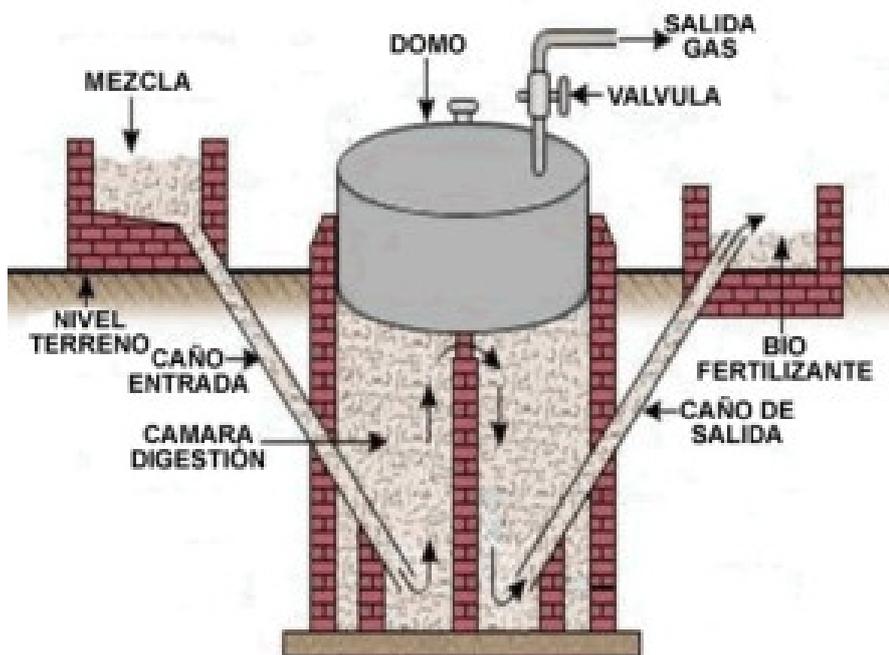


Figura 4.10. Modelo Indio del biodigestor

Asimismo, otra ventaja de este modelo es que no requiere de una cámara

externa para almacenar el biogás producido, lo que supone un ahorro de espacio y de dinero. Una variante de este diseño un poco más simplificada es que, en lugar de la campana, se instala una película o membrana de polietileno flexible que hace una función similar al domo siendo a su vez más asequible, sencillo y accesible.

■ Diseño Chino

Este modelo es un sistema cerrado con cámaras de entrada (carga) y salida (descarga). Si el mantenimiento es el apropiado pueden durar muchos años, lo que puede justificar su construcción, ya que tienen un alto gasto en su instalación. Es precisamente este hecho el que ha provocado que el modelo no se haya extendido por los países más pobres.

Como se puede observar en la siguiente figura, la cantidad de gas que se puede almacenar es muy pequeña, por lo que requiere un contenedor externo para dicho fin.

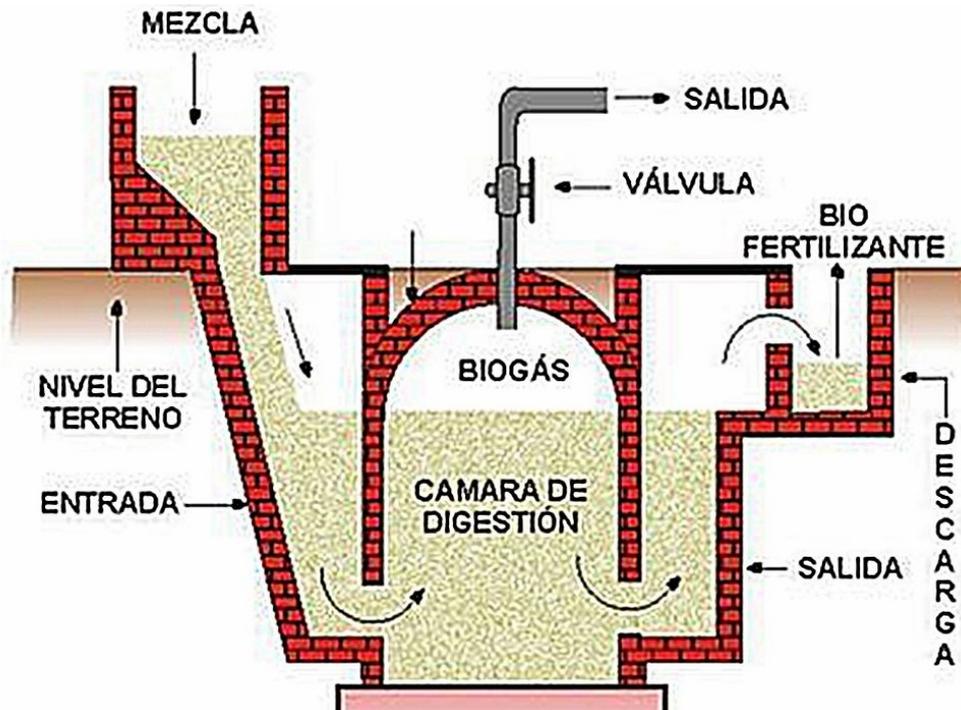


Figura 4.11. Modelo Chino del biodigestor

### Biodigestor semicontinuo de flujo pistón

Este tipo de biodigestores no tiene la cámara de digestión colocada verticalmente, sino que se coloca de forma alargada horizontalmente, por lo que la descomposición ocurre según la materia va avanzando. Son precisamente este tipo los que presentan generalmente un menor presupuesto para su construcción, por lo que suelen ser los más utilizados en zonas rurales.

- **Diseño horizontal**

Como se aprecia en la figura, el modelo consiste en una cámara horizontal similar a tubo de gran tamaño con la cámara de carga a un extremo y la de salida al otro. Una de las principales ventajas que presenta es que, gracias a su forma, la carga añadida diariamente no se mezcla con el efluente ya formado, al encontrarse en distintos extremos. Por tanto, esta configuración es la adecuada para aquellas materias orgánicas que necesitan un proceso más prolongado como las heces de seres humanos y ciertos residuos de animales.



*Figura 4.12. Modelo Horizontal del biodigestor*

Este tipo de biodigestores son muy populares en países subdesarrollados por su simple instalación, debido a que el material del que está fabricado es polietileno, fácil y barato. El tiempo de vida útil de los biodigestores horizontales suele ser de cinco años.

## *CAPÍTULO 4. EL BIOGÁS Y EL BIODIGESTOR*

---

Además de los diseños presentados aquí, existen otros tipos y adaptaciones de biodigestores según las características y materiales disponibles en cada lugar.

# Capítulo 5

## Diseño del biodigestor de Kazai

Esta es la parte central del proyecto y la que más se ha visto afectada por la situación del COVID-19, ya que ha imposibilitado el viaje a Zimbabue este verano y, por tanto, la implantación del biodigestor. Esto supone que no se van a conocer de primera mano las condiciones de Kazai, los materiales disponibles y las circunstancias e imprevistos específicos de cada situación. No obstante, se ha decidido ofrecer dos diseños de biodegestor que son los más comunes en zonas rurales. Para hacer esta propuesta lo más cercana a la realidad posible y que así se pueda implantar el día que se pueda ir allí, se han estudiado previamente otros proyectos de voluntarios que ya han estado en el país.

### 5.1. Diseño 1: Biodigestor de tanque vertical de agua

Este modelo consta principalmente de un tanque enterrado verticalmente casi por completo. Se exponen ahora las principales pautas de este diseño: [21].



*Figura 5.1. Diseño 1 propuesto para un biodigestor (sin enterrar)*

### 5.1.1. Materiales

Los materiales necesarios son:

- Un bidón de plástico con cierre hermético.
- Un tubo de PVC para conectar la cámara de carga con el bidón.
- Otro tubo de PVC para la salida de efluente de la cámara de digestión.
- Manguera o tubería de gas para la extracción del biogás.
- Tres válvulas para cada una de las tres conexiones con la cámara de digestión que permitan abrir y cerrar el paso.

- Ladrillos y cemento para construir las cámaras de carga de materia orgánica y de salida de efluente.
- Bridas o gomas para fijar las juntas.
- Silicona, cinta americana y pegamento.
- Otros materiales para ajustar el modelo según la situación como abrazaderas, juntas, botellas, bolsas, etc.
- Herramientas para poder llevar a cabo el proceso.

La cantidad y tamaño de los materiales se determinan de manera experimental una vez ya en la aldea para adecuarse de la mejor manera posible al lugar. Los materiales se pueden adquirir en Harare, la capital del país, la mayoría de ellos; mientras que las herramientas se pueden encontrar en el propio distrito o se pueden llevar desde España.

### 5.1.2. **Procedimiento de montaje**

En primer lugar, es necesario limpiar el lugar que se seleccione para la instalación, este debe estar también cerca de los hogares para que no sea demasiado tedioso transportar el biogás hasta ellos. A continuación, se debe excavar un foso de las dimensiones del bidón o un poco más grande para asegurarse. Al mismo tiempo, se pueden ir construyendo las dos cámaras de ladrillo a sendos lados del agujero.

El siguiente paso, realizar las perforaciones en el tanque, es determinante, ya que, según la altura de la tubería del digestato, este será más o menos fluido. El agujero para la entrada de materia orgánica se realiza en la parte superior, en los laterales se perforan otros dos: uno para salida de efluente orientándolo de manera que enfoque a la cámara correspondiente y otro para el exceso de fluidos. En la tapa se realiza otro agujero para la salida del biogás. Posteriormente, se conectan las tuberías entre las cámaras y el bidón colocando válvulas para controlar el proceso. Para la salida del biogás también se instala una válvula y es igualmente recomendable que el gas tenga una salida de seguridad en caso de que la presión aumente

considerablemente pudiendo llegar a provocar un accidente. Como el consumo de biogás se hará a diario, esta posibilidad es remota, pero todo buen ingeniero sabe que toda seguridad nunca es suficiente. La tubería de gas se conduce hasta los hogares para su uso en la cocina.

Paralelamente, se pueden conectar medidores de temperatura y presión para ir controlando el proceso y el biodigestor. Una vez finalizado, se hace una primera carga y hay que esperar a que esta empiece a producir biogás para comenzar con la adición diaria de materia orgánica.

### 5.1.3. Dimensiones del biodigestor

Aunque se ha comentado el hecho de que las dimensiones y medidas del aparato se calculan con mayor precisión de manera experimental adaptándose a las condiciones del lugar, se va a intentar dar unas indicaciones de cómo suelen ser normalmente las dimensiones para que así el diseño sea rentable en la producción de energía.

Para este primer modelo, se recomienda que el tanque de plástico sea de al menos 2000 litros para que así pueda producir bastante biogás para que la comunidad sea autosuficiente, lo que confirmaría que el biodigestor es realmente útil y hace diferencias reales. El agujero necesario para enterrar el bidón sería de unas dimensiones de una base cuadrada de 1,2m x 1,2m y una altura de 1,4m.

Los agujeros que se realizan en el bidón tienen que ser de la medida de la medida de los tubos de PVC que conectan las cámaras de entrada y salida con el tanque. Estos suelen ser de un 110mm de diámetro y de longitud variante según a qué distancia estén los distintos elementos. El agujero de la tubería de entrada se puede realizar sobre la superficie o en un lateral, mientras que el de la tubería de salida del digestato se debe realizar en un lateral y la altura dependerá de cómo queramos que sea la fluidez de la materia. Basándose en los modelos chinos, una altura recomendable para un biodigestor de estas medidas es de entre 20cm y 30cm sobre la base. El ángulo al que normalmente se colocan las tubería para conectarlos a las cámaras es de unos 45°, esto también puede servir de referencia para saber la altura a la que se deben perforar los agujeros en el bidón.

La tubería de gas tiene un diámetro mucho menor, en torno a 10-20mm, y la longitud es mayor que las otras, ya que tiene que transportar el biogás hasta la cocina para su uso. En cuanto a la dimensión de las cámaras de entrada y salida, esta es variable, pero no tienen que ser tampoco muy grandes. Con unas dimen-

siones de 40cmx40cmx40cm, unos 64 litros de capacidad, es suficiente.

#### 5.1.4. Indicaciones

Este modelo se asemeja al modelo chino pero de manera más sencilla, accesible y económica. Una de las ventajas de este diseño es que, al estar enterrado, mantener la temperatura dentro de un pequeño rango es más fácil y no hay que depender de encontrar un lugar sombrío. Así, es un modelo simple para que los habitantes locales puedan aprender a utilizarlo y mantenerlo, un aspecto muy importante para hacer el proyecto viable y sostenible. Su instalación es laboriosa, pero tampoco debería ser muy duradera y todos los materiales se pueden adquirir allí. Todos estos aspectos hacen que esta opción sea la más atractiva y sólida, en mi opinión, para instalar allí.

El presupuesto de este primer diseño está en torno a los 400-500 dolares americanos, dependiendo de imprevistos. En euros, son unos 355-445 euros, por lo que el presupuesto, al no ser muy alto, se puede financiar con los fondos obtenidos de las recaudaciones.

## 5.2. Diseño 2: Biodigestor semienterrado horizontal

Esta segunda opción es también muy común en zonas rurales. En este caso, el dispositivo no está enterrado por completo. Las principales características de este modelo se muestran a continuación [22].

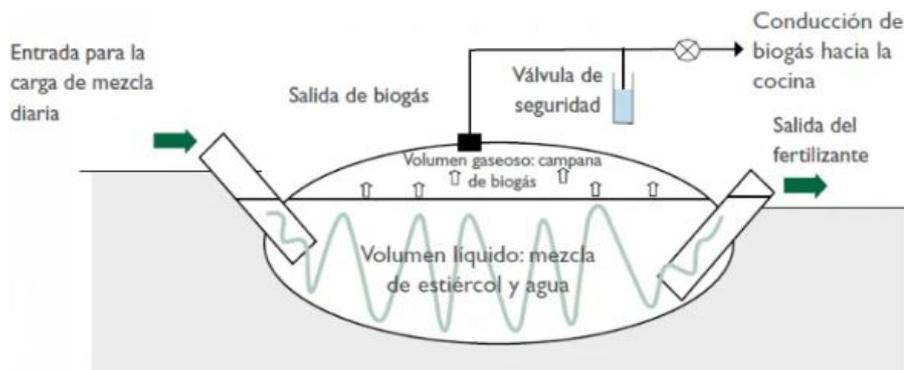


Figura 5.2. Diseño 2 propuesto para un biodigestor

### 5.2.1. Materiales

Los materiales necesarios son:

- PVC tubular ajustándose el tamaño a las necesidades.
- Dos tuberías de PVC para la entrada de la materia orgánica y la salida del efluente.
- Tubo largo de PVC para la salida del gas y para llevarlo hasta la cocina.
- Válvulas para las entradas y salidas.
- Ladrillos y cemento para construir las cámaras de carga de materia orgánica y de salida de efluente.
- Neumáticos para asentar bien el recipiente.
- Otros materiales y herramientas para reforzar y asegurar la instalación.

Al igual que en el primer diseño los materiales se pueden adquirir todos allí y son fáciles de manejar y económicos. Las cantidades y longitudes de cada uno dependerán de las características del lugar.

### 5.2.2. Procedimiento de montaje

Para empezar, se requiere limpiar la zona de instalación. Es conveniente que dicha zona se encuentre cerca de los hogares o de la cocina al menos y que esté en una zona sombría para que así la variación de temperatura no sea muy grande. Posteriormente, se cava una zanja de profundidad media donde la parte que esté cubierta será donde la mezcla de agua y materia orgánica se deposite y la parte no enterrada servirá de depósito del gas. Luego se adecua la superficie cavada para que la lona no sufra pinchazos o cortes. Por otro lado, se prepara la lona tubular uniendo extensas secciones de PVC, si no viene ya hecho con forma tubular, y se colocan las entradas y salidas con sus respectivas válvulas, incluyendo una de seguridad para el gas si es posible. Finalmente, se coloca el montaje en la zanja y

ya solo falta empezar a cargarlo.

### 5.2.3. Dimensiones del biodigestor

Al igual que se ha recalcado con el anterior diseño, las dimensiones y medidas del aparato se calculan con mayor precisión de manera experimental adaptándose a las condiciones del lugar. Sin embargo, se va a intentar dar unas indicaciones de cómo suelen ser generalmente las dimensiones para que así el diseño sea rentable en la producción de energía.

Para este segundo modelo, se pueden dar dos situaciones: que la lona de PVC ya venga diseñada de forma tubular, por lo que en tal caso se debe prestar atención al volumen que la lona puede contener, siendo este recomendable de al menos  $8\text{m}^3$  o 8000 litros. La otra situación es que haya que comprar la lona y de ahí construir el tubo. Para obtener un volumen similar a la primera situación se deben comprar  $40\text{m}^2$  de lona para estar seguros. Como este biodigestor está semienterrado, el agujero requerido para el mismo consta de una base de  $8\text{m} \times 1\text{m}$  y de una profundidad que ronda el metro de altura.

Las medidas de los diámetros de las tuberías de entrada y salida y de la tubería de biogás son las mismas que para el primer diseño, lo único que ahora, en vez de perforar un tanque, se realizan dos agujeros sobre la lona y luego se sellan con cinta, abrazaderas y pegamento.

En cuanto a la dimensión de las cámaras de entrada y salida, en este caso el tamaño también es variable, pero mayor que en el anterior caso, ya que tiene mayor capacidad la cámara de digestión. Estas cámaras deben ser de al menos 100 litros para que no haya ningún inconveniente y problema durante su uso.

### 5.2.4. Indicaciones

Con este modelo se crean generalmente cámaras de digestión más grandes que con el primer modelo, con una capacidad de unos  $8\text{m}^3$ , lo que se refleja en una mayor cantidad de biogás y efluente. La otra cara, es que es más complicado mantener una temperatura constante; no obstante, el material utilizado ayuda a ello, así como los factores de situarlo a la sombra y de solo rellenar con mezcla hasta la superficie. La instalación es bastante dura por el hecho de tener que cavar una zanja de grandes dimensiones, pero su empleo y mantenimiento es sencillo como el primer modelo. Además, una peculiaridad de este diseño es que la cámara de

salida donde se recoge el efluente se puede sustituir por cubos para que así sea luego más sencillo el transporte del fertilizante hacia los cultivos.

El presupuesto de este modelo es claramente inferior al otro modelo, ya que es el diseño más barato de un biodigestor. El coste es de 100-150 dolares americanos, 89-135 euros. Por lo que este biodigestor es tres veces más barato que el otro modelo.

### **5.3. Aspectos comunes a ambos modelos**

#### **5.3.1. Pautas conjuntas**

El aspecto más importante que cabe resaltar es que los dos diseños son principalmente **experimentales**, lo que significa que los diseños propuestos pueden sufrir variaciones e imprevistos habituales a la hora de la implementación. Como ya se ha mencionado, una vez instalado y aprendido el funcionamiento, es bastante sencilla la utilización del sistema, sea cualquiera de los dos diseños. Igualmente, es aconsejable dejar un manual con pautas a seguir en distintos escenarios para que las personas locales sepan como actuar en diferentes situaciones. Otro aspecto que comparten es que la construcción no debería alargarse mucho una vez que se dispone de todos los materiales necesarios. Por eso, durante el viaje a Zimbabue, que sería de unas 6 semanas, sería posible incluso instalar ambos modelos en dos aldeas distintas si se necesita.

#### **5.3.2. Inicio y desarrollo del proceso**

El proceso de llenado del biodigestor, de calcular la composición de la mezcla y de mantenimiento es muy similar en ambos.

Para la primera carga, se supondrá que se utiliza como materia orgánica estiércol de bovino (es la más común) y tiene una relación carbono-nitrógeno idónea. Para ambos modelos, la mezcla de entrada se recomienda que tenga un 10% de sólidos; por lo que si se utiliza heces de bovino, la relación debe ser que por cada kilogramo de materia orgánica se añadan dos litros de agua.

En el primer modelo, la cámara de digestión se rellena casi al completo de mezcla y no tiene espacio para el almacenamiento de biogás, por lo que es recomendable tener otro espacio a la salida para guardarlo hasta su uso. Por tanto,

aquí la primera carga consiste en llenar los alrededores de 2000 litros de capacidad de este diseño con la proporción de 1:2 entre materia y agua.

Para el segundo diseño, de unos 8m<sup>3</sup> de volumen, se debe añadir materia orgánica solo en la parte del biodigestor que está enterrada. El volumen enterrado suele ser del 50 % o 60 %, lo que está entre 4m<sup>3</sup> y 4,8m<sup>3</sup>. El resto se dejará como espacio para almacenar el gas.

La mezcla consistirá primordialmente de estiércol de bovino mezclado con agua, aunque también se pueden utilizar otras materias orgánicas. En primer lugar, es necesario comprobar la relación carbono-nitrógeno, ya que interesa que esta sea de entre 25:1 y 30:1. En el caso del estiércol es 25:1 así que encaja perfectamente con lo que se busca. A continuación, se presenta una tabla con la relación C:N para distintas materias:

<i>Materia</i>	<i>Proporción C:N</i>
Estiércol de bovino	25:1
Heces humanas	4:1
Heces de cerdo	16:1
Heces de oveja	33:1
Heces de ave de corral	20:1

Tabla 5.1. Relación Carbono-Nitrógeno en la materia orgánica

Así, si se dispone de más de una materia orgánica para la mezcla, se calculará la relación C:N con la siguiente fórmula:

$$r = \frac{Q_1 * r_1 + Q_2 * r_2 + \dots + Q_n * r_n}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}$$

Figura 5.3. Ratio de carbono-nitrógeno

Donde:

- r: ratio de C:N
- Q<sub>x</sub>: cantidad de la materia x
- r<sub>x</sub>: relación C:N de la materia x

A continuación, se presenta la problemática de cuánto agua añadir a la mezcla. Este parámetro se determina en una instancia de forma experimental, pero se pueden aportar unas directrices teóricas de cuánto debe ser dicha cantidad. En general, la suma total de sólidos en la muestra debe ser en torno al 10 %. Con eso podemos aproximar los kilogramos de agua necesarios por la siguiente fórmula:

$$KgH_2O = \frac{KgMO * (QSMO - QSmzcla)}{QSmzcla}$$

*Figura 5.4. Cantidad de agua requerida en la mezcla*

Donde:

- $KgH_2O$ : cantidad de agua requerida
- $KgMO$ : cantidad de la materia orgánica disponible
- $QSMO$ : cantidad de sólidos en la materia orgánica (calculado en porcentaje o sobre la unidad)
- $QSmzcla$ : cantidad de sólidos en la mezcla (calculado en porcentaje o sobre la unidad)

Por último, ya solo cabe determinar la cantidad de biogás y de efluente producido a diario. En este tipo de biodigestores caseros, la cantidad de biogás, dependiendo siempre del tamaño, está entre 700 y 1300 litros diarios, lo que supone de tres a cinco horas de gas para cocinar. En cuanto al fertilizante, la cantidad ronda los 80 litros [23].

## 5.4. Resumen y comparación de los modelos

En esta tabla se resumen y comparan los principales conceptos de este capítulo:

<i>Característica</i>	<i>Diseño 1</i>	<i>Diseño 2</i>
Modelo	Tanque vertical agua de	Lona tubular semienterrada horizontal
Tamaño	En torno a 2000 litros	En torno a 8000 litros (50 %-60 % enterrado)
Principales materiales	Bidón de plástico, dos tubos de PVC de 110mm de diámetro, tubería de 10-20mm de diámetro, válvulas de apertura y cierre, ladrillos o cemento para las cámaras de entrada y salida y otros materiales y herramientas	40m <sup>2</sup> de lona de PVC, dos tubos de PVC de 110mm de diámetro, tubería de 10-20mm de diámetro, válvulas de apertura y cierre, ladrillos o cemento para las cámaras de entrada y salida y otros materiales y herramientas
Primera carga	Llenado de la cámara de digestión (2000 L) casi por completo con la mezcla de excrementos de bovino y agua con una proporción 1:2	Llenado con la mezcla solo de la parte enterrada (4m <sup>3</sup> -4,8m <sup>3</sup> ) con la misma proporción 1:2. El resto del volumen es para almacenar el gas.
Tiempo de espera	Desde la primera carga hasta que se comienza a generar biogás: unos 30 días	Desde la primera carga hasta que se comienza a generar biogás: unos 30 días
Carga diaria	Unos 20 kg de materia orgánica para preparar la mezcla con agua	Unos 50 kg de materia orgánica para preparar la mezcla con agua
Presupuesto	Entre 400-500 USD	Entre 100-150 USD

*Tabla 5.2. Relación Carbono-Nitrógeno en la materia orgánica*

Cabe insistir en el hecho de que las medidas son aproximaciones, ya que es de manera experimental como se obtiene las verdaderas cantidades óptimas de llenado y carga diaria.



# Capítulo 6

## Conclusiones

Para comenzar, cabe resaltar la influencia que la situación del COVID-19 ha tenido en este proyecto, ya que ha modificado todos los planes y metas iniciales. La segunda parte del trabajo, la implantación del biodigestor, ha sido de momento suspendida, lo que implica que no se va a poder llevar a cabo antes de la entrega del TFG. En cuanto al diseño, que es principalmente experimental, se ha visto ajustado a un planteamiento teórico en el que se ha intentado acercarse a la realidad lo máximo posible ayudándose de anteriores proyectos de experiencias similares. Así, la situación de la pandemia ha afectado claramente a la idea inicial del proyecto, pero no ha evitado que el proyecto se haya realizado con calidad, formalidad y solvencia.

La metodología ha terminado siendo diferente, en concreto el último paso de la implementación que iba a ser en julio y agosto ya no se hará. Sin embargo, el resto del calendario sí que se ha cumplido, aunque ha podido haber algún desajuste entre las distintas secciones, habiendo necesitado un poco más de tiempo para algunas y un poco menos para otras de lo estipulado.

Los objetivos se han cumplido en la medida de lo posible debido al virus, ya que los que estaban relacionados con los materiales disponibles o con la puesta en práctica del biodigestor se iban a lograr una vez se estuviese en Zimbabue y, como esto no ha sido posible, se conseguirán cuando finalmente se pueda ir allí. Por otro lado, el objetivo de recaudación de fondos para los distintos proyectos que se iban a implantar con CFA y la Fundación de Ingenieros de ICAI, se ha perseguido hasta que llegó el confinamiento. Se hicieron camisetas y pulseras, se inició el contacto con empresas para patrocinar la iniciativa y se habían organizado varios eventos durante la primavera para la recaudación de fondos.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

---

En cuanto a la motivación, se ha visto afectada durante varias semanas cuando se veía venir lo inevitable, la cancelación del viaje. Eso se tradujo en un parón de la actividad del trabajo que luego se retomó y se finalizó con mucho ánimo.

Centrándose ahora en las conclusiones más técnicas que se refieren al proyecto, se pueden concluir las siguientes:

- Por lo investigado en otras experiencias similares, se ha concluido que la mejor opción para instalar en la zona rural de Kazai es un biodigestor de tanque vertical o uno horizontal semienterrado.
- El modelo de estos biodigestores sencillos consta de una gran parte experimental para poder determinar con exactitud su diseño. Por tanto, se ha ofrecido una propuesta teórica lo más cercana posible a lo que habría que hacer en la práctica, teniendo que adaptarse luego a imprevistos.
- A pesar de la situación actual debido al COVID-19, se intentará implantar el biodigestor cuando sea posible viajar a Zimbabue y, así, poder obtener un diseño más exacto al poder llevarlo a la práctica.
- El biogás es una alternativa sólida y sostenible para el cambio energético y una opción muy útil para zonas rurales donde el suministro de energía es muy escaso.
- El efluente también producido por el biodigestor contiene un gran valor energético y es muy útil para la zona de Kazai, ya que la agricultura es la principal actividad y este fertilizante mejorará la calidad y cantidad de los cultivos.
- La implantación del biodigestor evitará que niños y mujeres tengan que trasladarse diariamente a por leña, evitando así la deforestación; y ayudando a que estos grupos tengan más tiempo para formarse y crecer.

---

Por último, se quiere plantear la línea que seguirá este proyecto en el futuro y las implicaciones que tendrá si todo sale de manera favorable. Si la implantación de la instalación es correcta y comienza el proceso de generación de biogás y de fertilizante sin problemas, se espera que ocurran los siguientes pasos:

1. En primer lugar, se espera que las personas locales aprendan el proceso de implementación y el mantenimiento y, así, puedan ellos mismos llevar la idea al siguiente nivel y tratar de expandirlo por las zonas rurales vecinas.
2. De esta manera, se mejoraría los trabajos de la zona, ya que se requerirá empleo para la instalación y mantenimiento. Estos trabajos serían de mayor calidad que los actuales en la agricultura.
3. Además, si la línea de expansión se consolida, significaría que las zonas más pobres empezarían a ser independientes energéticamente hablando, y ayudaría a su desarrollo y a avanzar en la lucha por un mundo más igualitario, siguiendo los ODS.



# Capítulo 7

## Plan económico

### 7.1. Presupuesto general

En este documento se explicará el presupuesto necesario para la instalación de los diseños del biodigestor. Muchos de los elementos exigidos para el diseño resultan difíciles de encontrar en catálogos on-line de Zimbabue, por lo que se estimarán con productos comercializados en España.

#### 7.1.1. Diseño 1: Biodigestor de tanque vertical de agua

Se muestra los materiales necesarios para la implantación:

- Mano de obra
- Palas y picos
- Bidón de 2000 L de PVC
- Tubería de 110-120mm de diámetro de PVC de 4m.
- Tubería para el biogás de 15mm de diámetro y 20m.
- Válvulas de cierre y apertura
- Silicona 1L.
- Pegamento especial para PVC 0,5 L.
- Ladrillos de arcilla 80 ud.
- Botellas de plástico de 5L.

## CAPÍTULO 7. PLAN ECONÓMICO

- Cocina de gas con regulador de presión
- Herramientas varias

A continuación, se presenta la tabla con el plan de presupuesto:

<i>Artículo</i>	<i>Precio unitario</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio total</i>	<i>Fuente</i>
Palas	0,00 €	5		Proporcionadas por la aldea
Picos	0,00 €	2		Proporcionados por la aldea
Tanque de 2000 L.	299,99 €	1	299,99 €	Leroy Merlin
Tubería de 110-120mm	5,00 €	2	10,00 €	Leroy Merlin
Tubería de 15mm	8,73 €	1	8,73 €	Leroy Merlin
Válvulas	2,95 €	4	11,80 €	Leroy Merlin
Silicona 1L	12,99 €	1	12,99 €	Leroy Merlin
Pegamento 0,5 L.	9,10 €	1	9,10 €	Leroy Merlin
Ladrillo de arcilla	0,55 €	80	44,00 €	Leroy Merlin
Botellas de plástico 5 L.	0,89 €	2	1,78 €	Leroy Merlin
Cocinas de gas con regulador	13,85 €	1	13,85 €	Leroy Merlin
Herramientas	0,00 €			Llevadas desde España o proporcionadas por la comunidad local
Mano de obra	0,00 €			El trabajo se realiza entre los voluntarios y las personas de aldea
<b>PRECIO TOTAL</b>			<b>153,17 €</b>	

*Tabla 7.1. Plan de presupuestos para el diseño 1*

El coste de los materiales en Zimbabue es muy similar por lo que está referencia es buena guía. No obstante, el precio puede disminuir si algunos de estos materiales, como los ladrillos, las palas o los picos, los proporciona ya la comunidad local porque han sobrado de anteriores proyectos.

### 7.1.2. Diseño 2: Biodigestor semienterrado horizontal

Se muestra los materiales necesarios para la implantación:

- Mano de obra
- Palas y picos
- Lona de 40 m<sup>2</sup> de PVC
- Tubería de 110-120mm de diámetro de PVC de 4m.
- Tubería para el biogás de 15mm de diámetro y 20m.
- Válvulas de cierre y apertura
- Pegamento especial para PVC 0,5 L.
- Ladrillos de arcilla 80 ud.
- Botellas de plástico de 5L.
- Abrazaderas de acero inoxidable, 8 ud.
- Cocina de gas con regulador de presión
- Herramientas varias

## CAPÍTULO 7. PLAN ECONÓMICO

A continuación, se presenta la tabla con el plan de presupuesto:

<i>Artículo</i>	<i>Precio unitario</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio total</i>	<i>Fuente</i>
Palas	0,00 €	5		Proporcionadas por la aldea
Picos	0,00 €	2		Proporcionados por la aldea
Lona de PVC	49,99 €	1	49,99 €	Leroy Merlín
Tubería de 110-120mm	5,00 €	2	10,00 €	Leroy Merlín
Tubería de 15mm	8,73 €	1	8,73 €	Leroy Merlín
Válvulas	2,95 €	4	11,80 €	Leroy Merlín
Pegamento 0,5 L.	9,10 €	1	9,10 €	Leroy Merlín
Ladrillo de arcilla	0,55 €	80	44,00 €	Leroy Merlín
Botellas de plástico 5 L.	0,89 €	2	1,78 €	Leroy Merlín
Abrazaderas de acero inoxidable	0,49 €	8	3,92 €	Leroy Merlín
Cocinas de gas con regulador	13,85 €	1	13,85 €	Leroy Merlín
Herramientas	0,00 €			Llevadas desde España o proporcionadas por la comunidad local
Mano de obra	0,00 €			El trabajo se realiza entre los voluntarios y las personas de aldea
<b>PRECIO TOTAL</b>			<b>276,58 €</b>	

*Tabla 7.2. Plan de presupuestos para el diseño 2*

El coste de los materiales en Zimbabue es muy similar por lo que está referencia es buena guía. No obstante, el precio puede disminuir si algunos de estos materiales, como los ladrillos, las palas o los picos, los proporciona ya la comunidad local porque han sobrado de anteriores proyectos. Asimismo, si se diese la situación en la que ambos diseños se pueden instalar en aldeas cercanas, muchos costes se compartirían (palas, picos, etc.) y se reduciría la suma total.

# Bibliografía

- [1] EcuRed. *Zimbabwe*. 2019. URL: [www.ecured.cu/Zimbabwe](http://www.ecured.cu/Zimbabwe).
- [2] Redacción de La Vanguardia. *Datos y evaluación política Zimbabwe*. 2018. URL: <https://www.lavanguardia.com/politica/20180727/451124562335/datos-basicos-y-evolucion-politica-de-zimbabwe.html>.
- [3] Expansión. *Zimbabwe - Religiones*. 2017. URL: <https://datosmacro.expansion.com/demografia/religiones/zimbabwe>.
- [4] Child Future Africa. *CFA Projects*. 2020. URL: <http://childfutureafrica.org/projects/>.
- [5] Luz Guerrero. *Tipos de biodigestores y aplicaciones*. 2019. URL: [www.aboutspanol.com/tipos-de-biodigestores-y-sus-disenos-3417696](http://www.aboutspanol.com/tipos-de-biodigestores-y-sus-disenos-3417696).
- [6] PNUD. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. 2020. URL: <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>.
- [7] Jon. *Presa de Kariba*. 2020. URL: <https://megaconstrucciones.net/?construccion=presa-kariba>.
- [8] Energía comprometida. *Energía solar: cómo funciona*. 2018. URL: [https://www.energyavm.es/energia-solar-como-funciona/..](https://www.energyavm.es/energia-solar-como-funciona/)
- [9] D. Iborra. *África apunala el desarrollo sostenible con base en energías sostenibles*. 2019. URL: <https://www.cambio16.com/africa-apunala-el-desarrollo-sostenible-con-base-en-energias-renovables/>.
- [10] E. Rousaud. *Energía eólica: qué es, cómo funciona, ventajas y desventajas*. 2018. URL: <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/energia-eolica/>.
- [11] Reve. *Zimbabwe debe aprovechar la energía eólica*. 2020. URL: <https://www.evwind.com/2020/02/15/zimbabwe-debe-aprovechar-la-energia-eolica/>.
- [12] Energya VM. *Energía de biomasa: ¿en qué consiste?* 2018. URL: <https://www.energyavm.es/energia-de-biomasa/>.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [13] Estructuras Bioclimáticas Avanzadas. *La biomasa: producir energía con un sistema ecológico*. 2020. URL: <https://ebas1.es/producir-energia-con-la-biomasa/>.
- [14] Fundación Endesa. *¿Qué es la biomasa? Centrales de energía de biomasa*. 2020. URL: <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-de-biomasa>.
- [15] Electricidad B. *Centrales térmicas de biomasa*. URL: <https://sites.google.com/site/electricidadbelencs3b/6-generacion-de-electricidad/d-centrales-termicas-de-biomasa>.
- [16] Red Agrícola. *Lo básico para entender el biogás: sus usos y beneficios*. 2020. URL: <https://www.redagricola.com/cl/lo-basico-entender-biogas/>.
- [17] Carmen Estaban Paulau; Virginia. *Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás*. Inf. téc. 2010.
- [18] Lorenzo Acosta; Obaya Abreu. *La digestión anaerobia. Aspectos teóricos*. Inf. téc. 2005.
- [19] Rivas Solano; Faith Vargas; Guillén Watson. *Biodigestores. Factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad*. Inf. téc. 2009.
- [20] Energía Casera. *Clasificación de biodigestores*. 2009. URL: <https://energiacasera.wordpress.com/2009/09/17/clasificacion-de-biodigestores/>.
- [21] Ecoinventos. *Cómo fabricar un biodigestor*. 2020. URL: <https://ecoinventos.com/biodigestor-casero/>.
- [22] R Humano. *Biodigestor, qué es y cómo hacer uno*. 2019. URL: <https://ecocosas.com/energias-renovables/biodigestor/>.
- [23] RedBioLac. *Biodigestores*. 2020. URL: <http://redbiolac.org/biodigestores/>.



## *BIBLIOGRAFÍA*

---