



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN
BIODIGESTOR EN ZIMBABUE

Autor: Sara Montero Bravo

Director: Manuel Moreno García

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Diseño y optimización de un biodigestor en Zimbabue

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2021/22 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.

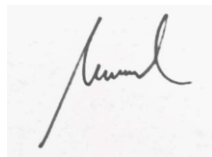


Fdo.: Sara Montero Bravo

Fecha: 11/ 07/ 2022

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Manuel Moreno García

Fecha: 11/ 07/ 2022



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN
BIODIGESTOR EN ZIMBABUE

Autor: Sara Montero Bravo

Director: Manuel Moreno García

Madrid

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN BIODIGESTOR EN ZIMBABUE

Autor: Montero Bravo, Sara

Director: Moreno García, Manuel

Entidad Colaboradora: Child Future Africa y Fundación Ingenieros de Icai

RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto consiste en el diseño de un biodigestor para su futura implantación en Zimbabwe. Durante el trabajo se realiza una documentación previa sobre el contexto del país y sobre las diferentes alternativas de biodigestores compatibles con este contexto. Se diseña un biodigestor de campana-fija y flujo-continuo desde cero.

Palabras clave: Biodigestor, Zimbabwe, diseño, campana-fija, flujo-continuo

1. Introducción

El trabajo tiene como objetivo solucionar un problema energético en una zona rural de Zimbabwe llamada Dotito. Los bajos recursos de la zona y la mala gestión de las compañías energéticas del país hacen que en Dotito sea difícil disponer de bienes básicos. Un biodigestor es una fuente de energía verde que convierte materia orgánica en gas y fertilizante. El gas se puede utilizar para cocinar y el fertilizante para futuros cultivos.

Con el proyecto no solo se pretende construir el biodigestor, sino que también se quiere enseñar a los habitantes de Dotito el cómo construirlo para que puedan instalar otros biodigestores en el futuro.

El trabajo se lleva a cabo con las organizaciones Child Future Africa y la Fundación de Ingenieros de Icai. Ambas organizaciones desarrollan trabajos de fin de grado/master solidarios durante el curso y estos trabajos se llevan a cabo en países subdesarrollados en verano.

2. Definición del Proyecto

Existen muchos tipos de biodigestor diferentes. Para la elección del biodigestor que más se adapta a las características de Dotito se realiza un análisis de información que conforma la primera parte del trabajo. En este análisis se estudia el contexto económico, social, histórico, y climático actual de Zimbabwe.

Una vez conocido el contexto del biodigestor, se analizan los modelos más compatibles con este. Estos modelos son el biodigestor de campana-fija, de campana-flotante, prefabricado de plástico y de bolsa de sustrato. Entre todas las opciones se concluye que el modelo más adecuado es el biodigestor de campana-fija, por su producción de gas, su vida estimada y su capacidad de conseguir los materiales de construcción en el área local.

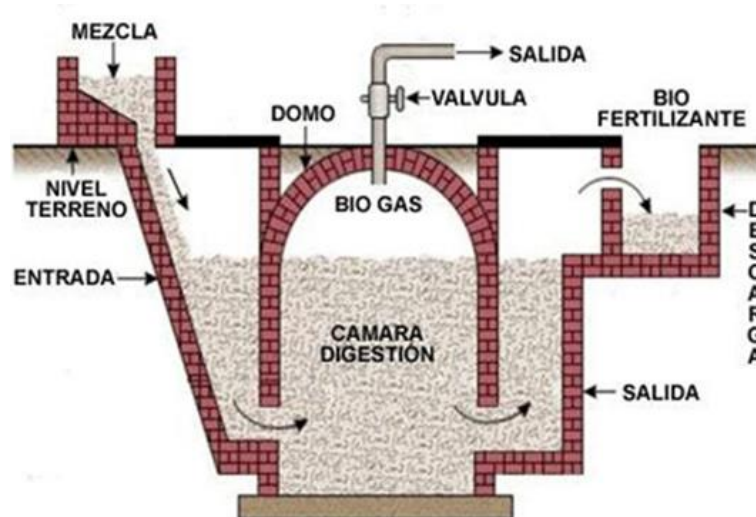
Para el diseño del biodigestor es necesario conocer el funcionamiento de la planta. El biodigestor transforma la materia orgánica mediante reacciones anaeróbicas producidas por bacterias metanogénicas. Estas bacterias se encuentran en ecosistemas donde no hay oxígeno o el nivel es muy bajo, como en el intestino de las personas. El depósito principal

del biodigestor está sellado de manera que no le entra oxígeno y es donde se llevan a cabo las reacciones químicas.

3. Descripción del modelo

Como se ha mencionado en apartados anteriores, el biodigestor diseñado es un biodigestor de cúpula-fija y flujo-continuo. Que sea de flujo continuo significa que nunca dejan de producirse las reacciones químicas en el interior del tanque. Y que sea de cúpula fija significa que la estructura está hecha de ladrillos y es fija.

Un biodigestor de cúpula fija tiene una vida estimada de 15-20 años, tiene un coste aproximado de 800€ y tarda en construirse 10 días. La estructura cuenta con tres depósitos; el depósito de carga donde se introduce la materia orgánica, el depósito principal donde se realizan las reacciones químicas y por donde sale el gas, y el depósito de descarga por donde sale el biosólido. El sistema cuenta también con un conjunto de tuberías y válvulas que transportan el gas hasta la cocina. En la imagen se observa un ejemplo de biodigestor de cúpula fija



Durante el diseño del biodigestor se realizará una explicación detallada del proceso de construcción, de la puesta en marcha y de su futuro mantenimiento. También se incluirá un estudio económico al final del trabajo.

4. Resultados

El diseño del biodigestor se realiza en función de la demanda de gas que se va a realizar. En este caso, la demanda es una pequeña cocina de una familia media, que no consume más de $0,45\text{m}^3$ de gas al día.

Una vez realizados los cálculos necesarios se obtiene que el biodigestor a diseñar tiene un volumen de 3m^3 , y una carga de mezcla diaria de $63,66\text{kg}$, de los cuales $12,73\text{kg}$ son

estiércol que proviene de vacas. Este número de kilos de estiércol se consigue con 4 vacas (aproximadamente).

Con el estudio económico se calcula el coste total del biodigestor. Este coste está compuesto por la mano de obra, los materiales necesarios para la construcción, y las herramientas para el mantenimiento. Se concluye que el gasto es de 700-800€. También se realiza una comparación de cuánto más rentable es la utilización de un biodigestor para conseguir gas, que la utilización de gas natural directamente. A nivel económico el biodigestor empieza a costar menos que el gas durante el tercer año de vida.

5. Conclusiones

Un biodigestor es una alternativa rentable a nivel económico y medioambiental para la producción de energía. Y es aplicable en países con escasos recursos, ya que su construcción es un proceso sencillo.

El biodigestor diseñado puede servir de gran ayuda a la población de Dotito por el servicio energético y por la posibilidad de más biodigestores en un futuro. Se cumplen así los objetivos del trabajo. Estos objetivos son el diseño y la implantación del biodigestor, y la educación de la población.

Al final del trabajo se plantea el biodigestor como una solución ante un problema de saneamiento. Aunque este no es el principal objetivo del biodigestor diseñado, se pueden utilizar este tipo de plantas para solucionar este problema de higiene global.

6. Referencias

[1] Gómez, M. J. (2019, 30 agosto). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. Desarrollo Sostenible. Recuperado 12 de febrero de 2022, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

[2] Rodríguez García, Daniel. (2021). Diseño, desarrollo e instalación de un digestor anaeróbico en Zimbabue para la conversión de desechos en gas natural. Universidad Pontificia de Comillas, ICAI. Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales. Madrid

DESIGN AND OPTIMIZATION OF A BIODIGESTER IN ZIMBABWE

Author: Montero Bravo, Sara

Supervisor: Moreno García, Manuel

Collaborating Entity: Chil Future Africa y Fundación de Ingenieros de Icai

ABSTRACT

The project consists in the design of a biodigester for its future implantation in Zimbabwe. A previous documentation on the country context and on the different alternatives of biodigesters compatibles with this context is carried out. In the project, a bell-fixed and continuous-flow biodigester is designed from scratch.

Keywords: Biodigester, Zimbabwe, designing, continuous-flow, fixed-bell

1. Introduction

The work arises with the motivation of wanting to solve an energy problem in a rural area of Zimbabwe called Dotito. The low resources of the area and the poor management of the country's energy companies make it difficult to obtain basic goods in Dotito. A biodigester is a green energy source that converts organic matter into gas and fertilizer. The gas can be used for cooking and the fertilizer for future crops.

The project not only aims to build the biodigester, but also to teach the inhabitants of Dotito how to build it so that they can install other biodigesters in the future.

The work is being carried out with the organizations Child Future Africa and the Icai Engineers Foundation. Both organizations develop solidarity end-of-degree/master projects during the course and these projects are carried out in underdeveloped countries during the summer.

2. Project definition

There are many different types of biodigester. To choose the biodigester that best suits Dotito's characteristics, an information analysis is carried out, which forms the first part of the work. In this analysis, the current economic, social, historical, and climatic context of Zimbabwe is studied.

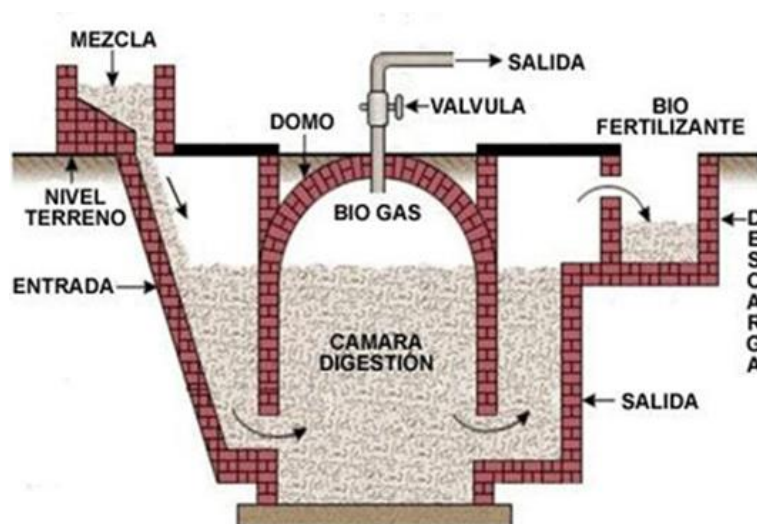
Once the biodigester context is known, the most compatible models are analyzed. These models are the bell-fixed, bell-floating, prefabricated plastic and substrate bag biodigester. Among all the options, it is concluded that the most suitable model is the fixed-bell biodigester, due to its gas production, its estimated life, and its capacity to obtain construction materials in the local area.

For the design of the biodigester it is necessary to know how the plant works. The biodigester transforms organic matter through anaerobic reactions produced by methanogenic bacteria. These bacteria are found in ecosystems where there is no oxygen or the level is very low, such as in the intestine of people. The main tank of the biodigester is sealed so that no oxygen enters it and is where the chemical reactions take place.

3. Model description

As mentioned in previous sections, the biodigester designed is a fixed-dome, continuous-flow biodigester. Continuous-flow means that chemical reactions never stop occurring inside the tank. And fixed-dome means that the structure is made of bricks and is fixed.

A fixed dome biodigester has an estimated life of 15-20 years, costs approximately 800€ and takes 10 days to build. The structure has three tanks; the loading tank where the organic matter is introduced, the main tank where the chemical reactions take place and where the gas comes out, and the discharge tank where the biosolid comes out. The system also has a set of pipes and valves that transport the gas to the stove. The image shows an example of a fixed dome biodigester.



During the design of the biodigester, a detailed explanation of the construction process, start-up and future maintenance is made. An economic study is also included at the end of the work.

4. Results

The design of the biodigester is made according to the gas demand to be realized. In this case, the demand is a small kitchen of an average family, which consumes no more than 0.45m³ of gas per day.

Once the necessary calculations have been made, it is obtained that the biodigester to be designed has a volume of 3m³, and a daily mixing load of 63.66kg, of which 12.73kg are manure coming from cows. This number of kilograms of manure is achieved with 4 cows (approximately).

With the economic study, the total cost of the biodigester is calculated. This cost is composed of labor, materials needed for construction, and tools for maintenance. It is concluded that the cost is 700-800€. A comparison is also made of how much more profitable it is to use a biodigester to obtain gas than to use natural gas directly. Economically, the biodigester starts to cost less than gas during the third year of life.

5. Conclusions

A biodigester is an economically and environmentally cost-effective alternative for energy production. And it is applicable in countries with scarce resources since its construction is a simple process.

The designed biodigester can be of great help to the population of Dotito for the energy service and for the possibility of more biodigesters in the future. Thus, the objectives of the work are fulfilled. These objectives are the design and implementation of the biodigester, and the education of the population.

At the end of the work, the biodigester is presented as a solution to a sanitation problem. Although this is not the main objective of the biodigester designed, this type of plant can be used to solve this global hygiene problem.

6. References

[1] Gómez, M. J. (2019, 30 agosto). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. Desarrollo Sostenible. Recuperado 12 de febrero de 2022, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

[2] Rodríguez García, Daniel. (2021). Diseño, desarrollo e instalación de un digester anaeróbico en Zimbabue para la conversión de desechos en gas natural. Universidad Pontificia de Comillas, ICAI. Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales. Madrid

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	6
1.1 Motivación del proyecto.....	6
1.2 Objetivos del trabajo	7
1.3 Metodología del trabajo.....	8
Capítulo 2. Estado de la cuestión.....	10
2.1 Localización del proyecto	10
2.2 Child future africa y la fundación de ingenieros de icai.....	11
2.3 Objetivos de desarrollo sostenible.....	12
2.4 Trabajos anteriores	14
Capítulo 3. Contexto Zimbabue	17
3.1 Historia	17
3.2 Contexto económico.....	18
3.3 Contexto social.....	20
3.4 Contexto climático	20
3.5 Energías	21
3.6 COVID-19.....	23
Capítulo 4. Investigación de la parte técnica.....	25
4.1 Digestión anaeróbica o funcionamiento de un biodigestor	25
4.1.1 Proceso químico.....	25
4.1.2 Posibles factores físicos y químicos para tener en cuenta	27
4.2 Tipos de biodigestor	30
4.2.1 Diferentes ejemplos de biodigestores.....	30
4.2.2 Elección de un biodigestor	34
4.3 Posibles problemas a la hora de implantar el biodigestor	36
Capítulo 5. Diseño del biodigestor	38
5.1 Parámetros por definir antes del diseño.....	38
5.1.1 Temperatura y tiempo de retención.....	38
5.1.2 Estiércol disponible.....	40
5.1.3 Producción de biogás.....	40

5.1.4 Volumen total del biodigestor.....	42
5.1.5 Consumo de biogás.....	43
5.1.6 Utilización del biosólido como fertilizante.....	43
5.2 Diseño.....	43
5.2.1 Dimensionamiento previo.....	44
5.2.2 Dimensionamiento.....	46
5.2.3 Plano del biodigestor	49
Capítulo 6. Construcción, puesta en marcha y mantenimiento.....	50
6.1 Plan de construcción.....	50
6.1.1 Materiales necesarios.....	58
6.2 Puesta en marcha	60
6.3 Mantenimiento.....	62
6.3.1 Posibles problemas en el mantenimiento	63
Capítulo 7. Plan económico y ahorro energético	65
7.1 Plan económico	65
7.2 Ahorro energético.....	70
Capítulo 8. Conclusiones.....	74
Capítulo 9. Bibliografía.....	76

Índice de figuras

Ilustración 1. Cronograma del plan de trabajo	8
Ilustración 2. Situación de Kazai, Zimbabue.....	10
Ilustración 3. Logo de la organización Child Future Africa y de la Fundación de Ingenieros de ICAI.....	12
Ilustración 4. Objetivos de Desarrollo Sostenible	12
Ilustración 5. Biodigestor Faso Bio-15. [2]	14
Ilustración 6. Diseño propuesto de biodigestor [3].....	15
Ilustración 7. Funcionamiento de un biodigestor UASB [4].....	16
Ilustración 8. Eje cronológico de la historia de Zimbabue.	18
Ilustración 9. PIB de Zimbabue durante los últimos años. (Fuente: datosmacro.expansion.com)	19
Ilustración 10. Contexto climático anual de Zimbabue. (Fuente: meteoblue).....	21
Ilustración 11. Sistema de distribución de energía en Zimbabue. (Fuente: Zimbabwe Power Company)	22
Ilustración 12. Muertes diarias por coronavirus en Zimbabue.	24
Ilustración 13. Esquema de la digestión anaeróbica [11]	26
Ilustración 14. Rendimiento del metano en función de sus diferentes componentes. [11].	28
Ilustración 15. Ejemplo biodigestor de cúpula fija.....	31
Ilustración 16. Ejemplo biodigestor con tambor flotante	32
Ilustración 17. Ejemplo de biodigestor prefabricado de plástico modelado	33
Ilustración 18. Ejemplo biodigestor de bolsa flexible de sustrato.....	34
Ilustración 19. Partes de un biodigestor de cúpula fija.....	48
Ilustración 20. Planta y alzado del biodigestor.....	49
Ilustración 21. Esquema del biodigestor sobre el nivel del terreno.....	52
Ilustración 22. Esquema de la estructura del biodigestor	53
Ilustración 23. Construcción del cuello del biodigestor	54
Ilustración 24. Esquema del biodigestor y los tubos de salida de gas, de carga y descarga	55
Ilustración 25. Primera válvula de control.....	56

Ilustración 26. Ejemplo de la tubería en T	56
Ilustración 27:Primera válvula de control y válvula para la liberación del agua	57
Ilustración 28. Demostración de sellado de agua [18].....	61
Ilustración 29. Comparación del consumo económico del gas	72

Índice de tablas

Tabla 1. Tiempo de retención en función de la temperatura	39
Tabla 2. Producción de estiércol en función del tipo de animal.....	40
Tabla 3. Relación sólidos totales y mezcla de carga diaria	41
Tabla 4. Factor de producción de biogás	42
Tabla 5. Cantidad de ganado necesario dependiendo de la región	45
Tabla 6. Precios del kWh en España	71

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace una introducción del proyecto con el objetivo de despertar el interés del lector por el trabajo realizado. Se explicará la motivación del proyecto, los objetivos y la metodología que se ha seguido durante el semestre.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Existen tres motivos por los que se han decidido realizar este proyecto. El primero tiene que ver con la parte social del trabajo, el segundo con la posibilidad de llevar a cabo un proyecto real y la tercera con el tema elegido.

Al seleccionarse el tema del trabajo de fin de grado, se buscó una cuestión con un trasfondo social, un proyecto con el que ayudar a las poblaciones que tienen menos recursos. La motivación principal del trabajo es la posibilidad de aplicar lo aprendido durante la carrera, de una manera solidaria, sin obtener nada a cambio. El desafío de suplir con energía a los ciudadanos de Dotito, se adapta a la perfección a esta necesidad de ayudar.

La segunda fuente de motivación es la posibilidad de crear algo. Todos los trabajos de ingeniería desarrollan proyectos que se van a llevar a cabo en un futuro; pero la posibilidad de ver y dirigir un proyecto que vaya más allá que una idea, motivó de manera considerable a la hora de elegir. Al seleccionar el Trabajo de Fin de Grado se podía optar entre un tema más teórico, de investigación; o un proyecto más real, más físico. Este trabajo se realiza con el objetivo de llevarse a cabo en Zimbabue durante el verano de 2022.

Por último, el trabajo está relacionado con energías y con el problema sanitario del mundo. Un biodigestor transforma materia orgánica en metano, con el que se produce energía. La materia orgánica son residuos que nadie quiere. Hoy en día existen muchos países en vías de desarrollo con un problema sanitario que hace referencia a toda la materia orgánica de la cual no se pueden desprender. Esta materia orgánica suele acabar en ríos, de donde

posteriormente beben agua, produciéndose así un problema higiénico aún mayor. El ser capaz de transformar algo que a primera vista no tiene utilidad, en algo tan útil como energía; hace que el proyecto sea muy atractivo. Aunque el trabajo se vaya a realizar a menor escala, y no tenga como objetivo resolver el problema sanitario del mundo; es un pequeño paso para proyectos más grandes.

1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO

A continuación, se citan los principales objetivos del proyecto:

- Diseño y optimización de un biodigestor en Zimbabue

Este es el principal objeto del trabajo, se va a desarrollar el proyecto para conseguir obtener una solución al problema energético actual en Zimbabue. A partir de materia orgánica se va a obtener gas natural y fertilizante.

- Implantación de la planta

El segundo objetivo es conseguir hacer realidad el proyecto. Esto conlleva que el diseño y la teoría se hagan realidad. Para ello durante el verano de 2022 se viajará a África con el objetivo de construir el biodigestor.

- La ayuda y educación hacia una sociedad diferente a la nuestra

Este último objetivo es el más abstracto de todos. Al implantar el biodigestor en Zimbabue, se quiere enseñar a los ciudadanos de allí el cómo se construye y cómo mantenerlo. De esta manera podrán contar con la energía del biodigestor y podrán construir más en el futuro. Se busca educar a la población en el tema de las energías, y proporcionarles recursos y alternativas para hacer frente a una crisis energética.

1.3 METODOLOGÍA DEL TRABAJO

A continuación, se muestra un cronograma de cómo se ha organizado el trabajo a lo largo del curso. Aunque el plan de trabajo no fue realista al 100%, la estructura a seguir sí que lo ha sido.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Recopilación y análisis de información	■							
Diseño de la planta			■					
Revisión del proyecto					■			
Entrega TFG					■			
Implantación de la planta							■	

Ilustración 1. Cronograma del plan de trabajo

La primera parte del trabajo es la recopilación y el análisis de la información. Se buscará información sobre la situación actual de Zimbabue, su economía, su demografía, su política... También se buscará información sobre el funcionamiento de un biodigestor, y más específicamente en una zona con un clima como el de Dotito. Se intentará conseguir tanta información como sea posible y después se analizará intentando seleccionar lo más relevante. En este apartado se tendrá en cuenta los anteriores biodigestores diseñados para Dotito.

La segunda parte es el diseño de la planta. Para esto se calcularán las medidas necesarias, se seleccionarán los materiales y se tendrá en cuenta el presupuesto. La información obtenida en el anterior apartado será utilizada. El objetivo será diseñar un biodigestor ideal con nuestras condiciones y se intentará optimizar este diseño.

La tercera parte es la revisión del proyecto. Se revisarán todos los cálculos y los posibles errores que se hayan podido cometer. También se buscarán otras alternativas al diseño, por si se pudiese mejorar.

La cuarta parte es la entrega del TFG. En este apartado el trabajo será evaluado y aceptado o no como trabajo de fin de grado.

Por último, la implantación de la planta. El objetivo final del proyecto es conseguir que el biodigestor funcione para el colegio de formación profesional. En esta fase del trabajo se viajará a Zimbabue y se intentará hacer realidad el diseño. Para ello se colaborará con la gente local y se les enseñará a construir y a hacer funcionar la planta.

Hay otra parte del trabajo que podría ser incluida. Al estar colaborando con una ONG, no cuenta con financiación propia, sino que hay que conseguirla. En anteriores proyectos de *Child Future Africa*, esto también era parte del trabajo de fin de grado. Pero al estar cursando el último año de carrera en el extranjero, no podré llevar a cabo esta fase.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Este capítulo tiene como objetivo justificar el por qué se realiza el trabajo. Para ello se aportará información sobre la localización del proyecto, las organizaciones con las que se va a trabajar, y la alineación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

2.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto se va a desarrollar en una población al norte del país de Zimbabwe. Más específicamente, en la zona rural de Dotito, que pertenece al pueblo de Kazai en el distrito de Mount Darwin. En la ilustración 6 se puede observar la localización del pueblo de Kazai dentro de Zimbabwe.



Ilustración 2. Situación de Kazai, Zimbabwe

2.2 CHILD FUTURE AFRICA Y LA FUNDACIÓN DE INGENIEROS DE ICAI

Child Future Africa es una ONG privada que fundada en 2002. La organización surge en la ciudad de Mount Darwin al construirse un orfanato para aquellos niños que no tienen un hogar. Con el paso de los años se han ido realizando otros proyectos relacionados con la educación de los habitantes de Dotito, que es la zona rural cerca de Mount Darwin. El objetivo es conseguir que los ciudadanos adquieran el suficiente conocimiento como para ser autosuficientes. Estando estos conocimientos relacionados con la educación de los niños, el uso energético, la ganadería y la agricultura.

Los proyectos más grandes que se han realizado han tenido que ver con los niños y las mujeres. Tras construir el orfanato, la organización se dio cuenta de que los niños del pueblo no tenían apenas educación. Después de terminar los estudios básicos, aquellos que querían seguir aprendiendo lo tenían que hacer con muy pocos recursos. Fue entonces cuando surgió la idea de crear un colegio para niños de hasta 18 años (lo que en España sería un instituto). Mientras que la infraestructura de Dotito crecía, también lo hacía la organización. Y cuando el colegio estuvo terminado, surgió la duda de que pasaba después con esos niños. La idea de un colegio de educación superior de agricultura y ganadería apareció en el mapa.

La organización trabaja con alumnos de grado desde 2017. Los alumnos desarrollan proyectos relacionados con la infraestructura y la sociedad de Dotito durante el curso y estos proyectos se llevan a cabo en Zimbabue durante el verano. Alguno de estos proyectos son la implantación de placas solares en el colegio, la implantación de un gallinero y una pocilga, o el método a seguir para la implantación del colegio.

Child Future Africa colabora con la Fundación de Ingenieros de ICAI desde 2017. La fundación surge en 2010 y contribuye a que los alumnos de ICAI puedan desarrollar sus trabajos de fin de grado y de máster, en ámbitos relacionados con la sostenibilidad y la justicia social. En la actualidad cuentan con proyectos en diferentes zonas de África, Sudamérica y Asia.



Ilustración 3. Logo de la organización Child Future Africa y de la Fundación de Ingenieros de ICAI

2.3 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

En 2015, diferentes países del mundo establecieron unas metas sostenibles con el objetivo de erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad de todo el mundo. Estas 17 metas u objetivos se observan en la ilustración 4. A continuación mencionaremos que objetivos se alinean con el proyecto. [1] (GOME19)



Ilustración 4. Objetivos de Desarrollo Sostenible

Objetivo 1: fin de la pobreza. Zimbabwe es un país con un nivel de pobreza alto, y el proyecto está orientado para ser implantado en este país. Al construir el biodigestor en Zimbabwe se estará contribuyendo a poner fin a la pobreza. El biodigestor supondrá una mejora en la calidad de vida de aquellos que lo utilicen (en este caso el colegio de formación profesional).

Objetivo 7: energía asequible y no contaminante: La obtención de energía a través de un biodigestor es considerada una fuente de energía renovable. Esto es porque para obtener el gas no se contamina a la atmósfera, ni se generan residuos no deseados. Es más, se consigue aprovechar residuos anteriores. El proyecto colabora a que cada vez más energía se obtenga de una manera segura y sostenible.

Objetivo 10: reducción de las desigualdades: Zimbabwe es un país en el que existen muchas desigualdades. Ya sea a nivel global, Zimbabwe está en una posición muy diferente a la de los países occidentales; o a nivel nacional, ya que dentro de Zimbabwe también existe la desigualdad. Las centrales que producen energía (ya sean procedente de combustibles fósiles, del petróleo o de fuentes renovables) están controladas por una minoría, y este tipo de energía no llega a las zonas rurales. Al implantar una planta de autoconsumo, estaremos ayudando a reducir esta desigualdad energética.

Objetivo 13: acción por el clima: el cambio climático está producido, en su mayor parte, por la emisión de CO₂ a la atmósfera. Mucha de la energía obtenida en Zimbabwe se obtiene a partir de la quema de petróleo o carbón. Este tipo de transformación de energía produce grandes cantidades de emisión de CO₂. En el biodigestor, al producirse una fermentación anaeróbica, se produce metano y no se expulsa CO₂. Ayudando así a frenar un poco el cambio climático.

Objetivo 15: vida de ecosistemas terrestres. En Zimbabwe es común el uso de madera para cocinar. Al implantar el biodigestor, se conseguirá gas, que se utilizará para calentar los alimentos; por lo que el consumo de madera disminuirá. Se estará contribuyendo así a frenar la deforestación.

2.4 TRABAJOS ANTERIORES

Este proyecto es el tercer proyecto con biodigestores que se va a llevar a cabo en Dotito. El primer proyecto fracasó debido a que las medidas del aparato eran demasiado grandes para el pueblo. Es decir, no se podía obtener toda la materia orgánica necesaria para que el biodigestor funcionase. El segundo proyecto de biodigestor fue desarrollado por un compañero de ICAI. En este caso las medidas eran las adecuadas, pero el biodigestor nunca llegó a funcionar debido a falta de formación de los encargados locales del mantenimiento de la máquina. Para este trabajo se va a utilizar la información obtenida en los diseños anteriores y aquella obtenida en nuevos documentos.

A continuación, se analizan brevemente 3 ejemplos de biodigestores llevados a cabo en África:

PNB-BF (Programme National Biodigestour).

Se trata de una organización que promociona el uso de biodigestores en el país de Burkina Faso, desde 2013 han colaborado en la construcción de más de 17.000 biodigestores. El modelo de biodigestor que desarrollan se conoce como Faso Bio-15. En este modelo la planta se encuentra semienterrada y la construcción se lleva a cabo por albañiles.

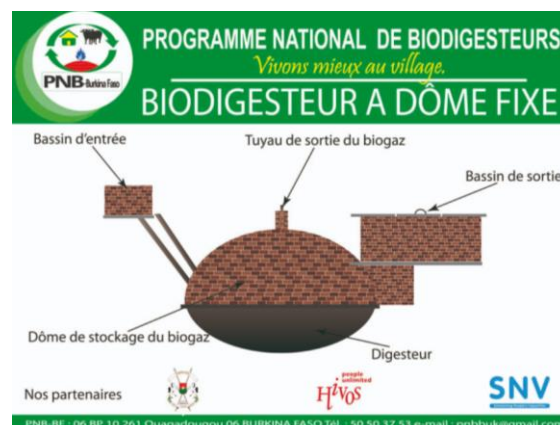


Ilustración 5. Biodigestor Faso Bio-15. [2]

Este tipo de biodigestor es demasiado complejo para el proyecto, aun así, es posible beneficiarse de la información de la que dispone la organización debido a su gran tamaño. Aunque los proyectos se llevan a cabo en un país del oeste de África, en vez de en Zimbabue, ambos países cuentan con una situación climática, social y económica parecidas a la de Zimbabue. [2]

Diseño de biodigestor de tanque vertical de agua (Ruiz Llorente, L.Teodoro, 2020)

Este es un diseño propuesto por otro estudiante para desarrollar en Kazai. La máquina es un bidón de plástico cerrado herméticamente en el cual se producen las reacciones químicas en su interior.



Ilustración 6. Diseño propuesto de biodigestor [3]

Este diseño es menos complejo que el anterior, y las dimensiones de la planta son más accesibles. Al estar diseñado para el pueblo de Dotito este tipo de biodigestor es una opción para el trabajo. [3] (RUIZ20)

Diseño de biodigestor UASB para Dotito (Rodríguez García, Daniel, 2021)

Este diseño fue desarrollado por un compañero de ICAI en su TFG durante el curso pasado. El biodigestor elegido fue un Biodigestor Anaeróbico de Flujo Ascendente (UASB). En este caso la materia orgánica se introducen la parte inferior de la máquina y posteriormente el gas asciende hasta la parte superior.

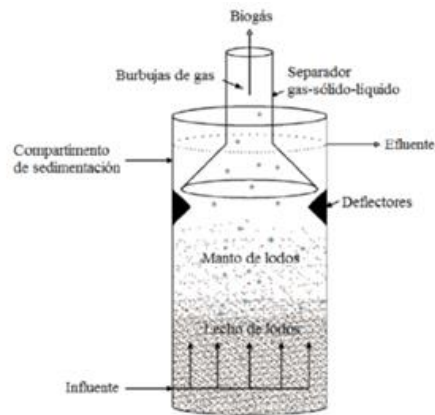


Ilustración 7. Funcionamiento de un biodigestor UASB [4]

Este diseño de biodigestor está creado para unas condiciones parecidas a las del proyecto actual, por lo que será estudiado con atención a la hora de desarrollar el trabajo. Otra ventaja de este biodigestor es la proximidad de las fechas de su desarrollo a la actualidad. [4] (RODR21)

Capítulo 3. CONTEXTO ZIMBABUE

En este capítulo se va a enunciar la situación actual en Zimbabwe. Para ello se analizará el contexto económico, social, político y energético. También se tendrá en cuenta el clima y la historia anterior del país, así como el impacto del covid sobre el territorio africano.

3.1 HISTORIA

Zimbabwe es un país cuya historia ha sido creada en un contexto de colonización, guerras, injusticia y diferencias sociales entre sus habitantes. El principio se remonta al siglo I. Durante los primeros siglos de historia habitaban en el territorio pueblos indígenas africanos, que posteriormente pasaron a estar controlados por la raza blanca. Los occidentales estaban interesados en el territorio por la posibilidad de esclavizar a los nativos y por las abundantes minas de oro de la región.

Durante los últimos 50 años, la historia de Zimbabwe pasa a estar marcada por la violencia. Desde 1921, con la designación del territorio como Rodesia del sur, surgen diferencias notables entre razas. La minoría blanca quería la independencia del país; mientras que la mayoría negra quería que el país no estuviese controlado por los blancos. Debido al miedo ante el nacionalismo negro, en 1951 se crea la federación de Rodesia y Nysalandia, en la que estaban incluidas Rodesia del Norte y del Sur. En 1965 los blancos declaran unilateralmente la independencia del país, la cual no es reconocida por ningún gobierno exterior.

En 1980 el país pasa a llamarse Zimbabwe, ya como país independiente reconocido, bajo el poder de Mugabe. Al principio de la presidencia de Mugabe se crea una ley que protege las tierras de la minoría blanca. Pero en 1991, el presidente anula esta ley y pasa a redistribuir estas tierras entre los nativos (el resultado pasa a ser el mismo problema que había, ya que estas tierras son controladas por funcionarios del gobierno). Durante el gobierno de Mugabe se pusieron en marcha varias propuestas socialistas; esto resulta en un aumento del 25% en los niños vacunados, se construyeron más de 500 centros de salud nuevos, la esperanza de

vida aumento 4 años, y la escolarización a niveles de primaria y secundaria también aumentaron. Estas políticas desencadenaron en un aumento de la deuda pública, aunque una mejora en la calidad de vida de los ciudadanos. [5] (MUNH13)

Finalmente, en 2017, se produjo un golpe de estado por parte del vicepresidente Emmerson Mnaangagwa, que acabo siendo desterrado. A finales de ese año Mugabe dimitiría y Emmerson asumió la presidencia hasta la actualidad. [6]

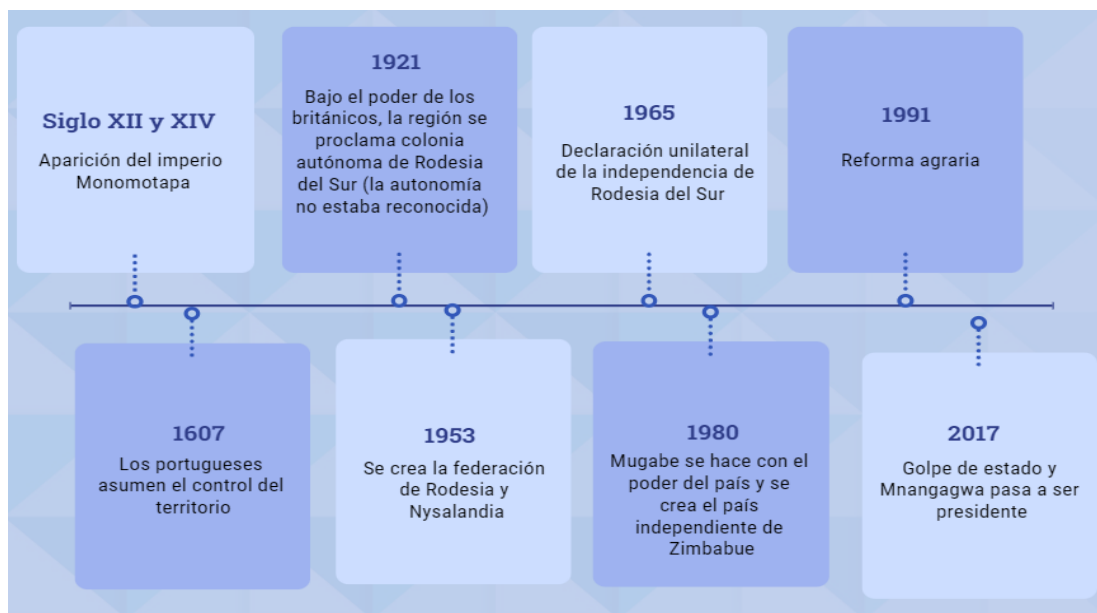


Ilustración 8. Eje cronológico de la historia de Zimbabwe.

3.2 CONTEXTO ECONÓMICO

La economía más reciente se desarrolla desde la presidencia de Mugabe. En este periodo de tiempo la economía del país se estancó. La reforma agraria (1991) resultó en la pérdida de empleos debido a la expropiación de las tierras. Y las políticas socialistas dieron paso a una hiperinflación.

En el año 2008, en un intento desesperado por mejorar la economía, el Banco Central de Zimbabwe puso más dinero en metálico en circulación. Ese año la inflación fue más alta que nunca (100 000%) y el PIB tuvo valores muy bajos (4,42 mil millones \$). En la ilustración

9 se puede observar una mejora del PIB en el año 2009 y posteriormente en el 2018 con la llegada de Emmerson a la presidencia del país. Con la llegada del coronavirus, la economía del país sufrió una bajada.



Ilustración 9. PIB de Zimbabue durante los últimos años. (Fuente: datosmacro.expansion.com)

En 2020 el PIB anual de Zimbabue fue de 15 804 M€ y el PIB per cápita de 1 063€. Estos datos sitúan a Zimbabue en el país número 165 de 196, una posición considerablemente baja. Las contribuciones al PIB de los diferentes sectores económicos son las siguientes. [7] Un 25% pertenece al sector primario y a la agricultura; Zimbabue produce alimentos como la caña de azúcar, el maíz o el tabaco. Un 25 % al sector secundario principalmente debido a la minería. Y por último el sector terciario abarca un 50%, encontrándose en esta categoría el comercio y los servicios. Los países a los que más exportan sus productos son Sudáfrica, China, República del Congo y Botsuana. Y los países de los que más importaciones reciben son Sudáfrica y China. El comercio tiene lugar con países africanos vecinos y asiáticos.

Zimbabue es un país cuya economía es de las más bajas del mundo. Sufre una desigualdad muy alta y los pocos beneficios que obtiene se lo lleva una pequeña minoría. La mayoría de la población tiene una vida austera y vive de lo que cultiva en pequeñas porciones de tierra, o de lo que gana trabajando para los propietarios de las tierras.

3.3 CONTEXTO SOCIAL

En el contexto social de Zimbabwe destacan las colonizaciones, el mal reparto de las tierras y la corrupción de la minoría que dirigen el territorio. Mientras que los ciudadanos intentaban mejorar el país apoyando a nuevos gobiernos que les prometían derechos, siempre se llegaba a la misma situación; beneficios para unos pocos.

Durante la presidencia de Mugabe el país recibió diferentes sanciones de la Unión Europea y de Estados Unidos por la violación de los derechos humanos, llegando a tener en 2010 el índice de desarrollo humano más bajo del mundo. En 2019 el índice de desarrollo humano de Zimbabwe fue de 0,571 puntos, situándolo en el puesto 150 del mundo (de los 190 países que conforman el ranking). Aun siendo este número muy bajo, fue mayor que el índice del 2018. Esto supone una visión positiva de hacia donde se dirige el país. [8]

Otros indicadores sobre el contexto social son la esperanza de vida, que es de 62,3 años. Este número está en la media de la esperanza de vida de los países africanos, pero está por debajo de la media mundial que es de 74 años. [8]. La tasa de natalidad es de 33,6 cada 1000 habitantes y la de mortalidad es de 9,3 muertes cada 1000 habitantes; ambos números por encima de la media mundial. Estos datos reflejan una sociedad donde la población varía más que la media y donde la esperanza de vida de los individuos es menor. Es decir, nace un gran número de gente al año, pero también se muere mucha. [9] (RAMO20)

3.4 CONTEXTO CLIMÁTICO

La posición geográfica de Zimbabwe es muy cercana al ecuador, por lo que no se aprecian grandes diferencias entre sus estaciones. No hay casi fluctuación entre las horas de sol o la media de temperaturas.

Se distinguen dos estaciones, la húmeda que abarca desde septiembre a abril; y la seca que se desarrolla durante el resto del año, puede no llegar a llover durante 183 días. La temperatura media durante todo el año es de 27°C, el índice UV es de 6 y la humedad media

del 64%. A continuación, en la ilustración 10, se muestran las precipitaciones y temperaturas de Zimbabwe durante todo el año. [8] [10]

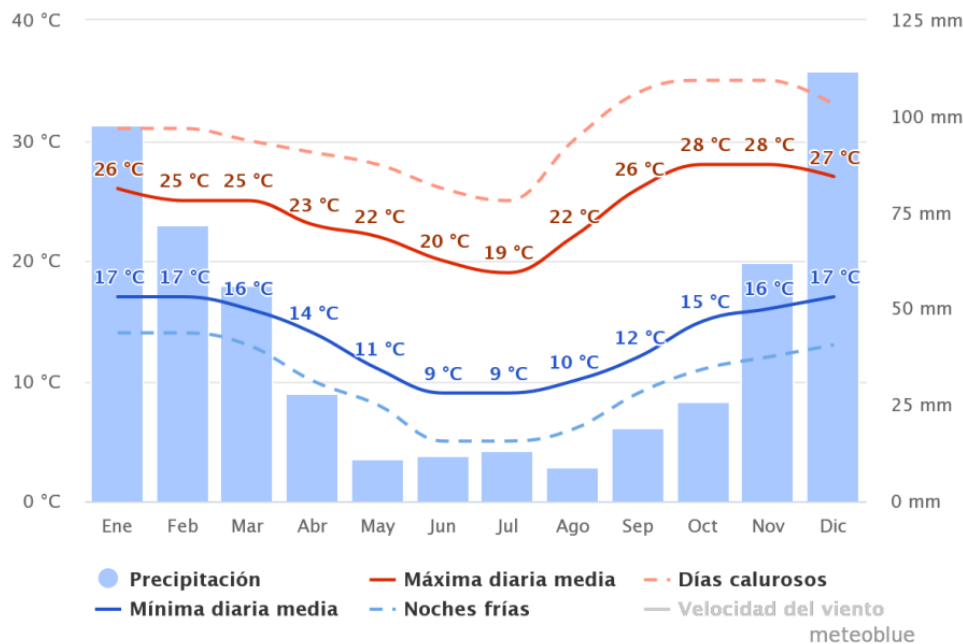


Ilustración 10. Contexto climático anual de Zimbabwe. (Fuente: meteoblue)

3.5 ENERGÍAS

Dado que el trabajo tiene como objetivo suplir con energía a la población de Dotito, es necesario discutir el contexto energético actual. La energía en Zimbabwe se obtiene, en su mayor medida, a partir de la combustión del carbón en centrales térmicas; aproximadamente un 58%. Un 37% se consigue a partir de centrales hidroeléctricas y el resto a partir de energías renovables (eólica, solar, biomasa y geotérmica).

El mejor indicador para comprender el balance energético de Zimbabwe es el consumo total de energía eléctrica al año, que es de unos 7.12 mil millones kWh. Y el consumo por habitante que es de unos 479 kWh. Si comparamos este último valor con la media en Europa (5.508,47 kWh), nos damos cuenta de que el consumo en Zimbabwe es mucho menor. El

41,4% de la población de Zimbabwe tiene acceso a la electricidad. Siendo este porcentaje menor en las zonas rurales, solo el 20,1% tiene acceso. Zimbabwe es capaz de autoabastecerse de energía con su propia producción. El 96% de la energía que utiliza, se consigue en Zimbabwe; el resto lo exportan de países vecinos.

Aunque los datos previos muestran una situación buena, la distribución de la energía en Zimbabwe tiene un tono más pesimista, ya que esta está distribuida de manera ineficiente. Las centrales del país sufren parones periódicos, y en muchas ocasiones, la red de transporte no llega a las zonas rurales. Los ciudadanos intentan solucionar estos problemas con baterías y generadores locales. Otro problema es que no se ha realizado ningún proyecto para aumentar la capacidad de generación de energía del país desde 1980. Esto hace que solo esté disponible el 60% de la capacidad de energía instalada. [3] (RUIZ20)

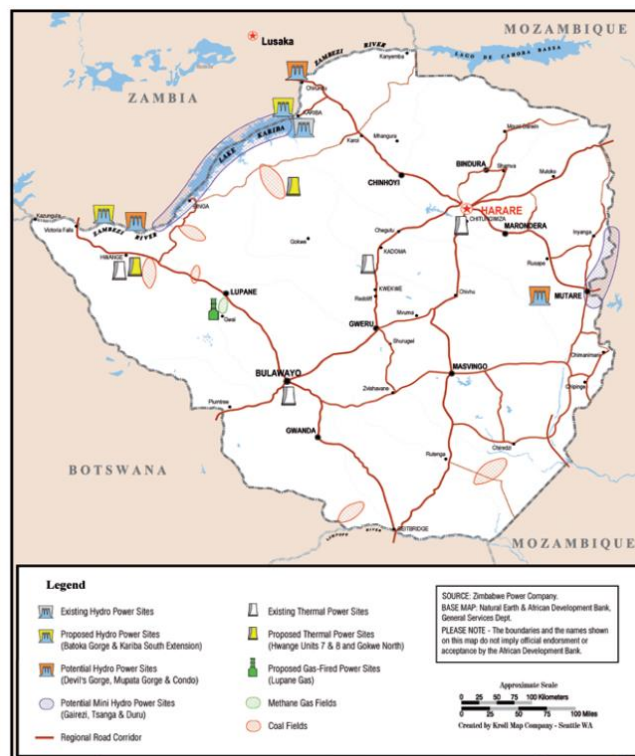


Ilustración 11. Sistema de distribución de energía en Zimbabwe. (Fuente: Zimbabwe Power Company)

Teniendo en cuenta todos los problemas que conllevan la distribución de energía, y sin muchos cambios en un futuro próximo, surge la idea del biogás. Un biodigestor permite

obtener energía a nivel local de manera ecológica. Muchas organizaciones llevan a cabo proyectos de biodigestores en zonas rurales de África (PNB_BF; Programme national Biodigestour¹). Aunque el problema energético del país es de un tamaño mayor. Un biodigestor es una alternativa sostenible y eficiente para solucionarlo a nivel rural. [8]

3.6 COVID-19

La pandemia global de coronavirus que empezó en enero de 2020 en China también llegó a Zimbabwe. El número total de casos registrados en el país asciende a 247.488, y el número de muertes es 5.468. El porcentaje de la población totalmente vacunada es el 24%, aquellos que tienen por lo menos una dosis es del 39,1% y los que han recibido la dosis de refuerzo un 5%. (Datos a 23 de abril 2022).

El país ha sufrido cuatro momentos críticos u “olas” a lo largo de la pandemia. La primera en agosto de 2020, seguida por otra en enero de 2021, en julio de 2021, y finalmente en diciembre de 2021; siendo esta última la más grave llegando a tener 7000 casos confirmados en el mismo día. En lo que respecta al número de muerte, el momento con un número más alto fue en julio de 2021, como puede observarse en la ilustración 12.

¹ Progamme National Biodigestour es una organización que promociona el uso de biodigestores en el país de Burkina Faso. Desde 2003 han colaborado en la construcción de más de 17.000 biodigestores.

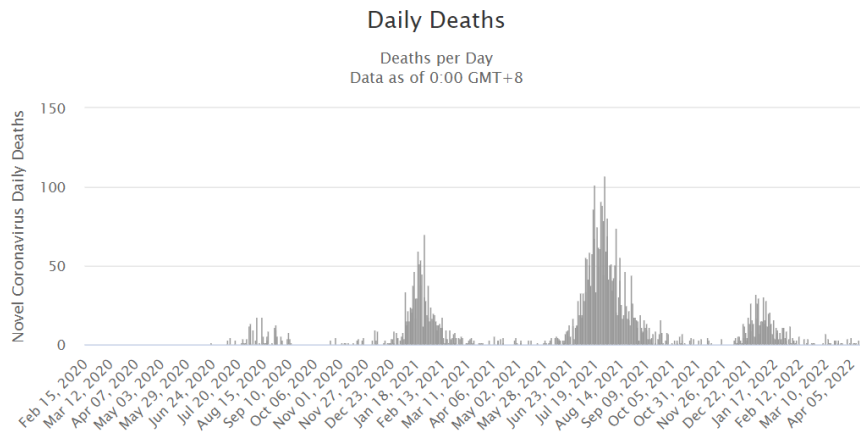


Ilustración 12. Muertes diarias por coronavirus en Zimbabwe.

La crisis sanitaria ha afectado a Zimbabwe de igual manera que al resto de países del mundo. Las altas temperaturas han ayudado a que el número de gente infectada sea menor. Pero la mala situación higiénica y los pocos recursos de los ciudadanos han hecho que aquellos que se infectasen tuviesen muchas posibilidades de morir. También hay que tener en cuenta que los datos registrados no coinciden con la realidad debido a que gran parte de la población no pudo informar de los contagios o muertes.

En el nivel económico el covid también ha afectado. Se puede observar en el apartado de contexto económico como en 2020 el PIB y los indicadores económicos eran más bajos. Por último, la asociación Child Future Africa no pudo llevar a cabo los proyectos diseñados para el verano 2020 y 2021 debido a la pandemia. Perjudicando así a la comunidad rural de Dotito donde se va a desarrollar el biodigestor.

Por último, hay que destacar que, aunque el Covid ha influido en la economía y en la tasa de mortalidad de Zimbabwe; el país cuenta con otras crisis sanitarias constantes. Este es el caso del VIH, el porcentaje de gente infectada es del 90% y la enfermedad es la primera causa de muerte en el país; en 2020 un 18,46% de las muertes [8]. La crisis contra el VIH es una crisis constante en Zimbabwe, y la aparición de otras enfermedades como el coronavirus contribuyen a que la sanidad del país sea peor.

Capítulo 4. INVESTIGACIÓN DE LA PARTE TÉCNICA

En este capítulo se va a explicar el proceso químico que se produce en el interior de un biodigestor. Se van a exponer los diferentes tipos de biodigestor que existen y que son compatibles con el proyecto, teniendo en cuenta los posibles problemas durante su funcionamiento. Y, por último, se seleccionará el tipo de biodigestor que más se adapte a nuestras necesidades y se argumentará el por qué.

4.1 DIGESTIÓN ANAERÓBICA O FUNCIONAMIENTO DE UN BIODIGESTOR

Toda la información obtenida para el apartado 4.1 ha sido obtenida de “*La digestión anaeróbica. Aspectos teóricos. Parte I; Y. Lorenzo Acosta y M. C. Obaya Abreu; 2005*” [11] (LORE05)

4.1.1 PROCESO QUÍMICO

El proceso químico que se realiza en un biodigestor es conocido como digestión anaeróbica. La digestión anaeróbica es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno, cuyos productos son: el biogás, mezcla de metano y dióxido de carbono; y un biosólido, mezcla acuosa que contiene los microorganismos responsables de la transformación de la materia orgánica.

El biogás resultante está compuesto en su mayor parte por metano (50 -70%) y dióxido de carbono (30-50%); aunque también puede tener otros elementos como nitrógeno u oxígeno. Este gas no tiene una potencia calorífica muy elevada, pero puede ser utilizado para cocinar, como se ha mencionado en apartados anteriores. El biosólido puede ser aprovechado como fertilizante natural.

La digestión anaeróbica se produce de manera natural al concentrarse cierta cantidad de materia orgánica en ausencia de oxígeno. El objetivo del proceso es descomponer la materia orgánica hasta acabar transformándola en gas. Para esto se producen cuatro fases, en las que la materia sólida irá haciéndose cada vez más pequeña mediante reacciones químicas. Durante el proceso, el 90% de la energía se transforma en metano y solamente el 10% de la energía se consume.

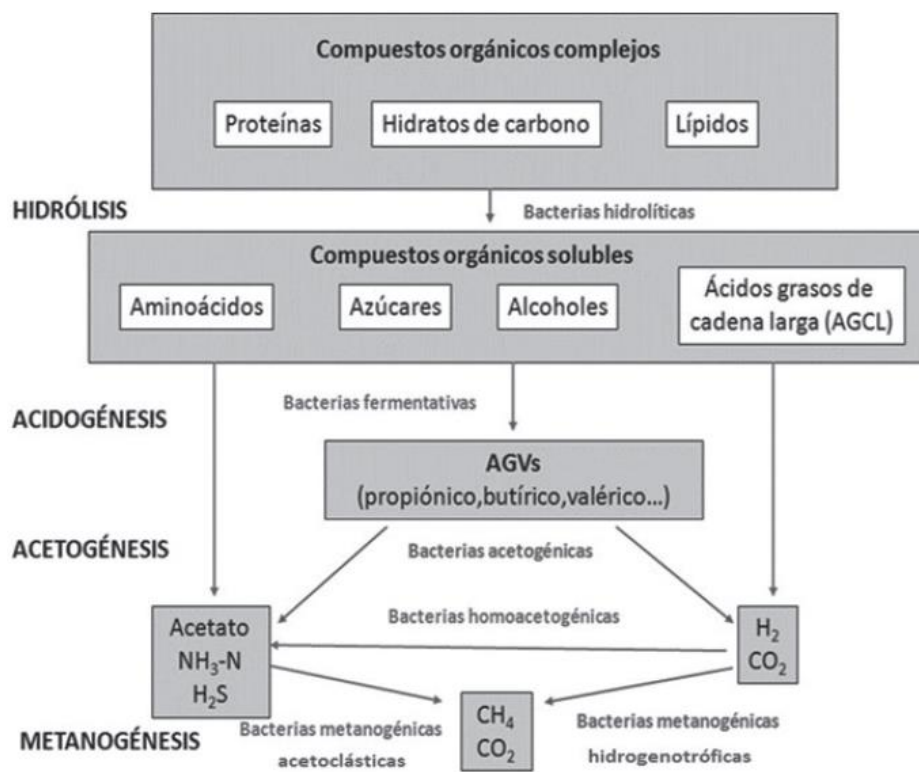


Ilustración 13. Esquema de la digestión anaeróbica [11]

1. Hidrólisis

En esta primera fase se va a producir una despolimerización de la materia orgánica. Aparecen las bacterias hidrolíticas (enzimas extracelulares) que transforman la materia orgánica compleja (lípidos, proteínas y carbohidratos) en compuestos solubles fácilmente degradables (azúcares, ácidos grasos de cadena larga, alcoholes y aminoácidos). Se transforman los

polímeros en monómeros. En este periodo se mejora la solubilidad y la viscosidad de la mezcla haciendo más sencillas los siguientes pasos.

2. Acidogénesis

Los compuestos solubles fácilmente degradables se convierten en ácidos de cadena gracias a la acción de las bacterias ácido génicas. Estos ácidos de cadena son el acético, propiónico o el butírico.

3. Acetogénesis

En esta etapa los compuestos solubles fácilmente degradables restantes se convierten en ácido acético, H_2 y CO_2 . Esta transformación es producida por las bacterias aceto-génicas.

4. Metanogénesis

Finalmente, los compuestos producidos tras la segunda y la tercera fase son convertidos en CH_4 gracias a las bacterias metanogénicas. Debido a una baja presión parcial del hidrogeno y del acetato en fase líquida se consiguen los sustratos, que sirven posteriormente de fertilizante natural.

4.1.2 POSIBLES FACTORES FÍSICOS Y QUÍMICOS PARA TENER EN CUENTA

Como la digestión anaeróbica es un proceso biológico, su correcto desarrollo depende de diferentes factores externos. Los factores físicos y químicos que más influyen son los siguientes:

- Composición residual

Dependiendo de lo complejas que sean las sustancias que conforman la materia orgánica, se va a producir más o menos metano. En la tabla se observan los rendimientos de los diferentes componentes. Se expresan en base a los kg de sólidos volátiles destruidos porque no todos los sólidos volátiles producen biogás.

Componente	% CH ₄	m ³ /kg SV destruido
Carbohidratos (C ₆ H ₁₀ O ₅)	50	0,886
Grasas (C ₅₀ H ₉₀ O ₆)	70	1,335
Proteínas (6C.2NH ₃ .3H ₂ O)	84	0,587

Ilustración 14. Rendimiento del metano en función de sus diferentes componentes. [11]

- Temperatura

No deben producirse cambios bruscos en la temperatura para que el proceso ocurra correctamente. Hay dos rangos de trabajo posibles; de 20-45° mesofílico y de 45-60° termofílico. Debido a que las temperaturas en Zimbabue oscilan entre los 8 y 28 grados durante todo el año, se estará trabajando de manera mesofílica.

- Acidez

El pH óptimo para el mejor funcionamiento se encuentra entre 6,6 y 7,6. Aunque un pH superior no dificulta en gran medida el proceso. Para regular el pH se puede añadir al proceso, álcali (cal o sosa), ácido, aguas residuales al reactor o se puede disminuir la carga orgánica aplicada.

Lo más común es añadir cal al digestor para incrementar el pH. Pero si se añade demasiada cal puede resultar en un gas con bajo contenido en CO₂, o si la cal no está correctamente mezclada, puede caer al fondo del digestor e interferir con los microorganismos.

- Contenido en sólidos

La relación óptima de sólidos-líquido para un biodigestor es menor de un 10% de sólidos. Por esta razón se intentará que la materia orgánica este húmeda, y si no es posible, se humedecerá con agua.

La adición de sólidos suspendidos puede mejorar el rendimiento del biodigestor. Se ha comprobado que al aplicar dosis de 100 a 150 mg/l de carbón activado se consigue reducir el tiempo de arranque en 5 días y la incrementación de la producción del biogás un 10-20%. (*Proceso para el tratamiento biológico anaerobio de aguas residuales industriales. Menéndez Gutiérrez, Carlos L y Pérez Olmo, Jesús M, 2003*).

- Nutrientes

Es necesario que haya azufre, fósforo, carbono, nitrógeno y algunas sales minerales para el crecimiento de los microorganismos.

- Existencia de cantidades de N y P

Hay que tener en cuenta la relación entre el carbono, el nitrógeno y el fósforo (C: N:P), siendo la relación óptima 100:2,75:0,25 en base a la Demanda Química del Oxígeno (DQO). El elemento en mayor cantidad tiene que ser el nitrógeno, aunque si sobrepasamos el ratio se corre el riesgo de producirse demasiado amoníaco.

- Tóxicos

Existen algunas sustancias que pueden ser letales para los microorganismos que colaboran en la digestión anaeróbica. Estas sustancias son algunos metales pesados, fenoles, tiosulfatos, tiocianatos, antibióticos, pesticidas, sales, cianuros, cloro y tensoactivos aniónicos. Hay que prestar atención a que estas sustancias no se encuentren en nuestra materia orgánica, para no entorpecer el proceso. Aun así, a mera aparición de estas sustancias no supone que no se pueda producir el proceso. Solo cuando se encuentran en grandes cantidades resultan un problema. También existen algunas sustancias que estimulan el proceso. El níquel, cobalto, molibdeno y selenio ayudan a una mayor producción de metano.

4.2 TIPOS DE BIODIGESTOR

Existen muchos tipos de biodigestores, estos tipos se pueden diferenciar por el tamaño, la finalidad y la materia prima requerida. Hay tres tipos principales de biodigestor. El primero son biodigestores rurales de uso doméstico; estos digestores utilizan estiércol de vaca como materia prima y utilizan la energía para cocinar, calentar el agua o iluminación. Si estos biodigestores son de mayor tamaño pueden disponer de generadores o turbinas para producir electricidad. El segundo tipo de biodigestor son los comunitarios. Este tipo se alimenta con residuos de cosechas y la fracción orgánica de residuos sólidos municipales; su principal función es la gestión de residuos (a parte de la obtención de energía). Y, por último, los biodigestores comerciales, que utilizan residuos de industrias agroalimentarias para obtener gas y electricidad.

Algunos datos que son necesarios saber antes de exponer los diferentes tipos de biodigestores:

- ➔ Para instalar un biodigestor se necesitan mínimo 3-4 vacas, para obtener un mínimo de 0,8-1,1 m³ de biogás
- ➔ 4 m³ de materia orgánica consiguen 800-1600 litros de biogás al día

Las ilustraciones e información utilizadas durante este apartado se obtienen de “*Lessons learned from on-farm biodigester programs in Africa. T.W.B Group. 2019*” [12] (TWB19)

4.2.1 DIFERENTES EJEMPLOS DE BIODIGESTORES

Dotito es una zona rural, sin muchos recursos, y la finalidad del biodigestor es obtener energía para cocinar. Es por esto, por lo que el tipo de biodigestor más adecuado para ser analizado es el primer grupo. A continuación, se muestran diferentes alternativas que son válidas para el proyecto.

1. Biodigestor de cúpula fija

Este tipo de biodigestor es una estructura fija construida con ladrillos y cemento. La estructura principal es un tanque donde se mezclan la materia orgánica y el agua, y donde se producen las reacciones químicas. El tanque tiene tres salidas con el exterior, una por donde se introduce la materia orgánica y el agua, otra por donde se extrae el biogás y una última por donde sale el biosólido restante.

El biodigestor de cúpula fija tiene una inversión de unos 800\$, una vida de 15-20 años, se tarda en construir 10 días, no se puede cambiar de sitio y necesita aproximadamente 6 m³, 40 kg/día de materia orgánica.

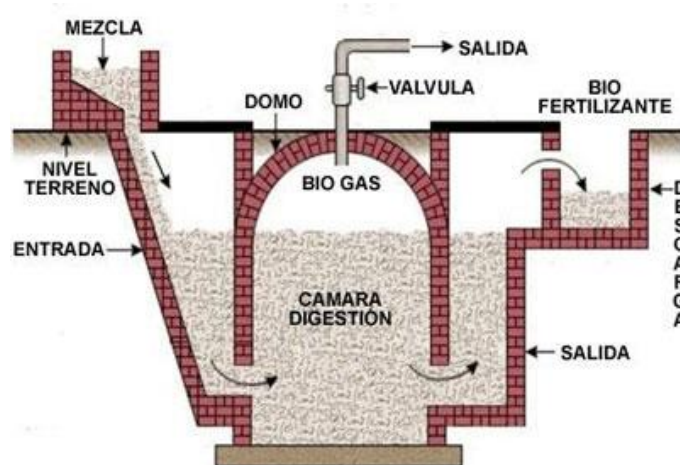


Ilustración 15. Ejemplo biodigestor de cúpula fija

Las principales ventajas son que no tiene unos costes de construcción muy elevados, tiene una esperanza de vida alta, la construcción proporciona empleo local, no se necesitan importaciones y la presión y la temperatura se mantienen estables. Sus desventajas son que se necesita pintura de emulsión acrílica para el interior del biodigestor (que puede ser difícil de obtener), no es adecuado para todo tipo de suelos, es difícil de reparar si se estropea y, tiene un alto riesgo de fugas si no se construye adecuadamente.

En el capítulo de estado de la cuestión, en trabajos anteriores, el biodigestor PNB-BF es un biodigestor de cúpula fija.

2. Biodigestor con tambor flotante

Este tipo de biodigestor es muy parecido al de cúpula fija, pero se diferencian en que dispone de un tambor flotante en el interior del tanque que controla el nivel de gas del interior. También es una estructura fija construida con ladrillos y cemento, que cuenta con un tanque y tres salidas al exterior.

El biodigestor con tambor flotante necesita una inversión de un 1000\$, tiene una esperanza de vida de 10-15 años y se tarda en construir 20-25 días. Para su construcción se necesita ladrillo, cemento y soporte de gas de acero, no se puede cambiar de sitio y convierte, aproximadamente, 6m³ en 40 kg/día.

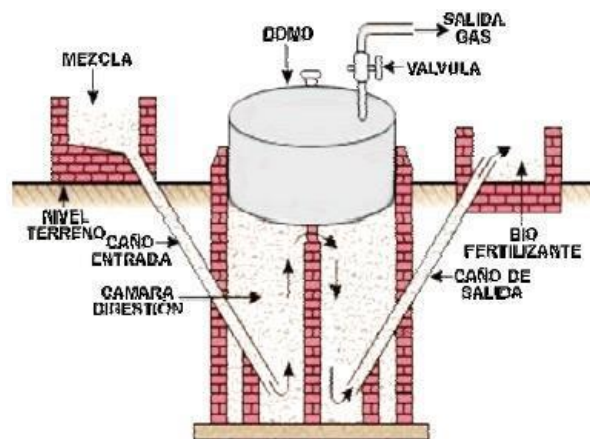


Ilustración 16. Ejemplo biodigestor con tambor flotante

Las ventajas son las mismas que las del digestor de cúpula fija sumándole que se puede ver el volumen de gas almacenado a simple vista. Y las desventajas son que los materiales tienen un coste de construcción mayor y que el mantenimiento de la estructura es más complejo.

3. Modelo prefabricado de plástico moldeado

La estructura de este modelo es un tanque cilíndrico de plástico con una entrada para la materia orgánica, una salida para los biosólidos, y una tubería para la salida del biogás. El biodigestor se llena hasta la mitad y se rellena con cantidades de materia orgánica más pequeñas cada dos semanas.

Este tipo de biodigestor necesita una inversión inicial de unos 700\$, tiene un tiempo de uso de unos 30 años y se tarda en instalar 1 día. Está hecho de plástico y se puede cambiar de localización. Transforma 6m³ a 40 kg/día.



Ilustración 17. Ejemplo de biodigestor prefabricado de plástico modelado

Las ventajas de este modelo son que es fácil de producir en muchas cantidades, la estructura es difícil de dañar y no hay errores a la hora de construirlo. Sus desventajas son que tiene unos costes de transporte altos (debido a que el producto se obtiene de fuera de Zimbabwe), el modelo no proporciona empleo local, supone la producción monopolística de una sola empresa, y es un modelo muy nuevo que no se sabe si funciona durante un largo periodo de tiempo.

En el capítulo de estado de la cuestión, en trabajos anteriores, el biodigestor de tanque vertical de agua (segundo ejemplo) es un biodigestor de plástico modelado.

4. Modelo de bolsa flexible de sustrato

Este modelo está compuesto por una bolsa de plástico a nivel de la tierra, un depósito de alimentación de entrada y diferentes dispositivos térmicos, mecánicos y eléctricos. El sustrato fluye a través de una bolsa tubular de plástico. Y, el gas se recoge mediante una tubería conectada a la bolsa.

Este tipo de biodigestor necesita una inversión inicial de unos 600\$, tiene un tiempo de uso de 15 años y tarda en instalarse 1 día. Está hecho de plástico y PVC; es un dispositivo móvil y transforma 9 m³ en 40 kg/día.

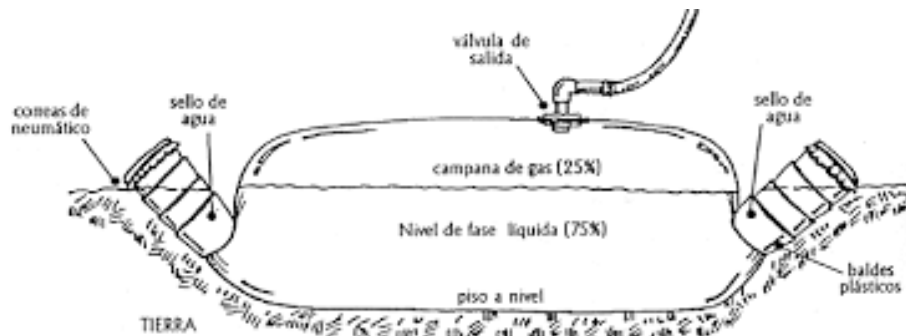


Ilustración 18. Ejemplo biodigestor de bolsa flexible de sustrato

Las principales ventajas de este digestor es que es apto para todo tipo de suelos, es fácil de construir en masa y su mantenimiento y reparación son sencillos. Las desventajas son que el plástico es sensible a la radiación solar y el dispositivo es propenso a ser dañado por factores externos, la existencia de posibles impuestos de importación y transporte, los pequeños errores de instalación producen daños mayores después, y el modelo necesita el doble de agua que otros modelos.

4.2.2 ELECCIÓN DE UN BIODIGESTOR

En este apartado se va a seleccionar el tipo de biodigestor que se va a diseñar. Para la elección se tendrán en cuenta los factores sociales, económicos, climáticos, históricos, y energéticos mencionados en el capítulo sobre el contexto de Zimbabue. Se tendrán también en cuenta los diferentes tipos de biodigestores, sus ventajas y desventajas, mencionadas en el apartado anterior.

La inversión inicial del proyecto no debe ser muy elevada, debido a los recursos de la población. Aunque al ser un proyecto solidario, la población de Dotito no pagaría nada de esta inversión. Nuestros cuatro tipos de biodigestor necesitan una inversión aproximada de entre 600\$ y 1000\$, siendo el más caro el biodigestor de tambor flotante y el más barato el de la bolsa flexible de sustrato.

En lo que se refiere a la protección del biogás, tres de los cuatro tipos de biodigestores transforma 6m³ a 40kg/día. Transformando una cantidad de 9m³ a 40kg/día el modelo de bolsa flexible de sustrato. Por lo que definimos como el menos eficiente este último tipo de modelo, ya que necesita más materia prima para transformarla en la misma cantidad de gas.

Para el biodigestor del proyecto se busca un biodigestor que no venga prefabricado. Se considera que un biodigestor que suponga una obra (que esté hecho de ladrillo y cemento) es más adecuado. Este tipo de construcción tiene las ventajas de proporcionar empleo local y que las materias primas que se utilizan se encuentran en la zona rural. También supone la educación y el desarrollar en los ciudadanos de Dotito el conocimiento de cómo construir un biodigestor.

Llegando a este punto podemos eliminar el biodigestor de bolsa flexible de sustrato, ya que es menos eficiente que el resto, es prefabricado y supone la mayor inversión inicial. Y el modelo prefabricado de plástico modelado, porque es prefabricado y cuenta con la desventaja de ser un modelo muy nuevo del que se desconoce bastante información.

El biodigestor de cúpula fija (o domo fijo) y de domo flotante son muy parecidos. Ambos biodigestores se consideran biodigestores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanquet). Este tipo de biodigestores son tanques de formas cilíndricas en los cuales existen un lecho de lodos activados anaerobios donde se producen las reacciones químicas. Ambos son estructuras enterradas, pero el de domo flotante tienen un funcionamiento más complejo. La principal ventaja del modelo de domo flotante frente al de domo fijo es la capacidad de ver el gas almacenado a simple vista. Pero el digestor de domo flotante necesita una inversión inicial mayor, y se tarda en construir 20-25 días. Frente al biodigestor de cúpula fija que necesita para su construcción 10 días. Debido a que el periodo de tiempo estimado para la implantación de la planta en Zimbabue es de mes y medio, es recomendable que el tiempo de construcción sea el mínimo posible. El resto del tiempo se utilizará para poner el digestor en funcionamiento y enseñar a los ciudadanos su mantenimiento.

Debido a que se espera que la complejidad del proyecto sea la mínima posible y a las razones explicadas con anterior, el biodigestor que más se adecúa al trabajo es el biodigestor de cúpula fija.

4.3 POSIBLES PROBLEMAS A LA HORA DE IMPLANTAR EL BIODIGESTOR

El diseño de un biodigestor es un proyecto de ingeniería, y como todo proyecto ingenieril hay que tener en cuenta aquellos factores que pueden hacer que el desarrollo del trabajo fracase. Existen considerables factores que podrían hacer que esto pasará, a continuación, se mencionan los más importantes y usuales.

- **Problemas técnicos**

Los problemas técnicos más comunes están relacionados con la falta de materia orgánica o de agua. En lo que se refiere a la materia prima (estiércol, residuos de cultivo), hay que tener en cuenta que los agricultores que disponen de poco ganado son más reacios a adquirir un biodigestor al no disponer de la suficiente materia prima. O es posible que la materia orgánica disponible ya se esté usando para otras actividades. Para el agua, no se debería tener un acceso de agua a más de 20-30 min andando (1 km).

Otros problemas técnicos son la falta de conocimientos de los ciudadanos a la hora de construir y reparar el biodigestor. La dependencia de importar los materiales para la construcción del biodigestor, siendo común altos costes para obtener piezas en caso de reparación. Por último, un fallo técnico común es no haber considerado correctamente el terreno donde se implanta el digestor, o no haber contado con la posibilidad de migración de la población donde se construye.

- **Problemas económicos**

El problema económico más importante es el alto coste de implantación del digestor. Los costes de inversión y de construcción pueden ser demasiado elevados para los granjeros a

los que van dirigidos este tipo de biodigestores (que tienen unos ingresos medio-altos). Hay que tener también en cuenta que la finalidad principal del biodigestor es usar el gas para cocinar; si conseguir madera es más barato que construirlo, los ciudadanos no van a estar interesados.

- **Problemas socioculturales**

El problema sociocultural más importante es la falta de motivación y de conocimiento de los usuarios. Un estudio en Uganda reveló que el 80% de los casos de implantación de un biodigestor, eran abandonados por los granjeros en un periodo de 4 años (Lwiza et al, 2017). Los biodigestores necesitan un mantenimiento continuo, que, si los usuarios no están dispuestos a concederlo, resulta en una pérdida del dinero invertido. Otro problema cultural que existe es la preferencia de los ciudadanos de cocinar de la manera tradicional, con una estufa de leña, en lugar de con el gas obtenido a partir del biodigestor.

- **Problemas institucionales**

Este tipo de problema son de carácter legal. Son la ausencia de políticas y normas en el uso de biodigestores y, la ausencia de una organización a nivel nacional para promover el biogás.

Capítulo 5. DISEÑO DEL BIODIGESTOR

En este capítulo se va a empezar la parte técnica del trabajo. Se van a realizar los cálculos y diseños necesarios para el modelado del biodigestor.

Como se ha mencionado con anterioridad, el tipo de biodigestor que se va a diseñar es un biodigestor de campana fija de flujo continuo. En el diseño se tendrán en cuenta el contexto de la comunidad para la que se va a implantar, siendo esta una comunidad rural con escasos recursos. También se tendrá en cuenta que al tener que realizar el diseño antes de ir al lugar de implantación de biodigestor, muchos resultados tendrán que estar ejecutados con posibilidad de cambiar una vez llegado a Zimbabue.

Primero se definirán todas las características, y después, se especificará para nuestro modelo.

5.1 PARÁMETROS POR DEFINIR ANTES DEL DISEÑO

Se van a examinar con profundidad algunos parámetros mencionados en capítulos previos, como la temperatura del biodigestor. También se van a desarrollar otros conceptos nuevos como el volumen del biodigestor, o la cantidad de estiércol necesario.

Toda la información y las tablas de este apartado han sido sacados del libro *“Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación. Jaime Martí Herrero, 2008”* [13] (HERR08)

5.1.1 TEMPERATURA Y TIEMPO DE RETENCIÓN

Antes de empezar con el desarrollo de esta sección es necesario definir lo que es el tiempo de retención. El tiempo de retención es el tiempo que la materia orgánica está en el tanque del biodigestor antes de convertirse en biogás y biosólido. Es el tiempo que tardan las bacterias metanogénicas en realizar la fase final de la reacción anaeróbica.

La temperatura es el parámetro más importante a la hora de implantar un biodigestor ya que esta define la actividad de las bacterias. Cuanta más temperatura haya en el depósito del biodigestor, más actividad tienen las bacterias, y menor es el tiempo necesario para que se produzcan las reacciones químicas. Existen tres tipos de climas posibles en las regiones donde se implantan biodigestores familiares; el trópico, el valle y el altiplano.

Región característica	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)
Trópico	30	20
Valle	20	30
Altiplano	10	60

Tabla 1. Tiempo de retención en función de la temperatura

Como se ha visto en apartados anteriores la temperatura de Zimbabwe oscila entre los 9°C en las noches de junio-julio hasta los 28°C en los días de octubre-noviembre. Más específicamente en Mount Darwin la temperatura media varía entre los 12°C y 31°C y rara vez baja de 10°. [14]

La temperatura en Mount Darwin es ligeramente más alta que en Zimbabwe. Esta característica resulta ventajosa a la hora de conseguir biogás, ya que a temperaturas menores de 5°C las bacterias dejan de reaccionar.

Para definir en qué tipo de clima se va a encontrar nuestro biodigestor, y cuánto tiempo de retención va a ser necesario, hay que tener en cuenta la temperatura media de cada día. La temperatura media diaria durante los meses cálidos es aproximadamente 21°C, y durante los meses fríos de 15°C. Podemos concluir que el clima característico de Mount Darwin es el valle, con 20°C de media durante todo el año y un tiempo de retención aproximado de 30 días.

5.1.2 ESTIÉRCOL DISPONIBLE

La materia orgánica que se va a usar para alimentar el biodigestor son deshechos producidos por animales. Cada tipo de animal produce una cantidad diferente de estiércol fresco al día como se puede observar en la tabla.

Ganado	Kg de estiércol fresco producido por cada 100 kg de peso del animal
Cerdo	4
Bovino	8
Caprino	4
Conejos	3
Equino	7
Humano adulto	0,4 kg por adulto
Humano niño	0,2 kg por niño

Tabla 2. Producción de estiércol en función del tipo de animal

Es importante tener en cuenta que si los animales son de pastoreo solo se podrá obtener un 25% del estiércol producido, mientras que si los animales son de corral se podrá obtener el 100%.

Para el correcto funcionamiento del biodigestor se debe introducir una mezcla de carga diaria, formada por agua y estiércol. La proporción adecuada de estos materiales es 1:4; es decir, cuatro porciones de agua por cada una de estiércol. En caso del estiércol bobino podría considerarse una mezcla de 1:3. En cualquier circunstancia es mejor que la mezcla quede acuosa para que no se produzcan atascos dentro del aparato debido a materia sólida, y el biodigestor sea realmente de flujo continuo

5.1.3 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

La carga de estiércol determina la cantidad de biogás que se produce cada día. Más específicamente, la producción de biogás diaria depende de la cantidad de sólidos volátiles

que haya en la carga de estiércol. Para ello se empezará explicando cómo se calcula el número de sólidos dentro de la materia orgánica.

Los sólidos totales (kg/m^3) son el peso del estiércol una vez secado, es decir, es la cantidad de materia sólida real que se introduce en el biodigestor. El estiércol fresco tiene entre un 13-20% de sólidos totales, siendo el número utilizado para los cálculos un 17%. Si solo introdujésemos materia orgánica al biodigestor, la cantidad de sólidos totales sería el peso del estiércol multiplicado por 0,17. Pero como lo que introducimos al biodigestor es una mezcla de estiércol y agua se utilizarán los siguientes factores:

Material	Sólidos Totales (%)
Estiércol fresco	17
Mezcla 1:4	3.4
Mezcla 1:3	4.25

Tabla 3. Relación sólidos totales y mezcla de carga diaria

Por otro lado, los sólidos volátiles (kg/m^3 día) son aquellos sólidos dentro de los sólidos totales que tienen posibilidad de pasar a fase gaseosa. El 77% del sólido total diario pertenece a esta categoría.

La producción de biogás diario ($\text{m}^3_{\text{biogás}} / \text{m}^3_{\text{VL}}$ por día) se obtiene multiplicando la mezcla de carga diaria por el porcentaje de sólidos diarios (en nuestro caso por 0,034 al ser una mezcla 1:4). Y después multiplicando ese número por 0,77 para obtener la cantidad de sólidos volátiles. Una vez obtenido la cantidad de sólidos volátiles, la producción de biogás depende de un factor asociado al tipo de ganado del que proviene el estiércol (tabla 4). Con este valor multiplicado por el volumen del líquido se obtienen el volumen de biogás producido por día ($\text{m}^3_{\text{biogás}} / \text{día}$).

Ganado	Factor de producción	Factor general
Cerdo	0.25-0.50	0.39
Bovino	0.25-0.30	0.27

Tabla 4. Factor de producción de biogás

ECUACIONES

$$\text{Sólidos Totales (ST)} = \text{mezcla de carga diaria} * 0,034 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$\text{Sólidos Volátiles} = ST * 0,77 \text{ [Kg/m}^3 \text{ al día]}$$

$$\text{Producción de biogás (PB)} = SV * \text{factor general} \text{ [m}^3_{\text{biogas}}/\text{m}^3_{\text{VL}} \text{ por día]}$$

$$\text{Producción biogás dentro de un biodigestor} = PB * V_L \text{ [m}^3_{\text{biogas}}/\text{día} \text{]}$$

5.1.4 VOLUMEN TOTAL DEL BIODIGESTOR

El volumen del biodigestor es determinado por la carga de estiércol diario y la temperatura.

- El volumen total del biodigestor es la suma del volumen líquido de la carga diaria y el volumen gaseoso del interior del depósito. $\rightarrow V_T = V_L + V_G$
- El volumen líquido ocupa $\frac{3}{4}$ partes del volumen total $\rightarrow V_L = \frac{3}{4} * V_T$

Volumen líquido

El volumen líquido es el resultado de multiplicar la mezcla de carga diaria por el tiempo de retención. $\rightarrow V_L = \text{carga diaria} * TRH$

$$\text{carga diaria} = \text{Kg estiércol} + L \text{ agua}$$

5.1.5 CONSUMO DE BIOGÁS

Como se ha mencionado en apartados anteriores el objetivo del biogás es producir energía para cocinar. El consumo de una cocina doméstica ronda los 130-170 litros por hora (aproximadamente). Supondremos, para nuestro diseño, que el uso de la cocina no superará las 3 horas diarias; la cantidad total de biogás que queremos obtener es de 450 litros.

5.1.6 UTILIZACIÓN DEL BIOSÓLIDO COMO FERTILIZANTE

El líquido que queda después de producirse la digestión anaeróbica se conoce como biosólido o biol. Este líquido tiene un PH de 7,5 y un contenido de nitrógeno de 2-3%, de fósforo de 1-2%, de potasio de 1%, y un 85% de materia orgánica.

Antes de usar el biosólido como fertilizante, es recomendable dejarlo reposar un tiempo medio de 30 días una vez haya salido del biodigestor. Cuanto mayor tiempo de retención, mejor será la calidad del fertilizante. El tiempo de reposo se produce en el depósito de descarga.

Los usos más comunes del fertilizante son los siguientes. El biosólido nada más salido del depósito de descarga se puede usar para regar el terreno después de ararse. Una mezcla de agua y biosólido en cantidades 1:1 se usa para introducir las semillas en la mezcla 4-5 horas antes de ser plantadas. Y por último el fertilizante también se puede usar como producto para fumigar. Se utiliza una mezcla con agua de proporción 1:4. Nunca se debe fumigar cuando el cultivo este floreciendo porque el fertilizante puede llegar a quemar los cultivos.

5.2 DISEÑO

Una vez obtenidos todos los parámetros y formulas necesarias, se procede a realizar el diseño teórico del biodigestor.

La información e ilustraciones usadas durante el punto 5.2 han sido sacadas del libro “*Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas*. José Antonio Guardado Chacón. 2007” [15] (CHAC07)

5.2.1 DIMENSIONAMIENTO PREVIO

Existen diferentes maneras de diseñar un biodigestor, se puede diseñar según la disponibilidad de estiércol; o como en este caso, según la necesidad de combustible. Como no se sabe la cantidad de materia orgánica de la que se dispone se va a diseñar el biodigestor en función de la demanda de biogás. En nuestro caso la demanda de biogás es la de una cocina pequeña en la que se cocinará como máximo 3 horas al día, consumiéndose 450 litros de biogás.

Para el dimensionamiento del biodigestor son necesarios los siguientes datos. La demanda energética del usuario, la cantidad de biomasa disponible, la temperatura media del lugar y la producción específica de gas según la biomasa disponible. Disponemos de todos los datos a excepción de la cantidad de biomasa disponible. Para esto hallaremos la cantidad de mezcla diaria que se introduce al tanque. En el caso de que el ganado fuese porcino²:

$$0,45 = SV * 0,39 \rightarrow SV = 1,154 \text{ Kg/m}^3 \text{ al día}$$

$$1,154 = ST * 0,77 \rightarrow ST = 1,5 \text{ Kg/m}^3 \text{ al día}$$

$$1,5 = m * 0,034 \rightarrow \text{Mezcla de carga diaria} = 44,07 \text{ Kg}$$

De esta carga diaria un quinto es materia orgánica que proviene de los cerdos (8,81 kg). Teniendo en cuenta que un cerdo tiene una excreta húmeda diaria de 2,25 kg, necesitaremos aproximadamente 4 cerdos de corral europeos para conseguir el estiércol.

En el caso de que el ganado fuese bovino:

$$0,45 = SV * 0,27 \rightarrow SV = 1,67 \text{ Kg/m}^3 \text{ al día}$$

$$1,67 = ST * 0,77 \rightarrow ST = 2,16 \text{ Kg/m}^3 \text{ al día}$$

² Las diferencias entre el ganado porcino o bovino y su generación de biogás se obtienen de la tabla 4 que se encuentra en el capítulo 5

$$2,16 = m * 0,034 \rightarrow \text{Mezcla de carga diaria} = 63,66 \text{ Kg}$$

De esta carga diaria, igual que en el ejemplo anterior, un cuarto es materia orgánica (15,92 kg). “Una vaca europea tiene una excreta diaria de 25kg/día” (A. Bavera, 2006).

Existe diferencia en la cantidad de deposiciones que realiza una vaca según la especie de animal, la región donde vive o el tipo de alimentación. En el caso del ganado africano, produce un cuarto del estiércol que los europeos. Por lo que para obtener 15,92 kg de estiércol necesitaríamos una vaca europea y cuatro africanas. En el caso del ganado porcino necesitaríamos una cantidad de 12 cerdos africanos. [16] (BAVE06) A continuación, se muestra una tabla con la cantidad de ganado necesario según el continente para obtener 450 litro de biogás, que es la demanda propuesta para el diseño. Los datos son una aproximación, ya que no se puede generalizar todo el tipo de ganado de un continente.

Tipo de ganado	Continente	
	EUROPA	ÁFRICA
Porcino (8,81 kg estiércol)	4	12
Bovino (15,92 kg estiércol)	1	4

Tabla 5. Cantidad de ganado necesario dependiendo de la región

5.2.2 DIMENSIONAMIENTO

Una vez que hemos obtenido todos los datos necesarios, definiremos el volumen total que tendrá el biodigestor. Para los cálculos se va a utilizar el ejemplo bovino debido a que en Dotito hay más vacas que cerdos.

Datos

Demanda energética del usuario = 450 litros/día

Cantidad de biomasa disponible = 64 kg de mezcla diaria

Temperatura media del lugar = 20°C

Producción específica de gas según la biomasa disponible = 0,45 m³ de gas

Teniendo en cuenta que el tiempo de retención son 30 días, y que cada día se introducen 64 kg de mezcla diaria. El biodigestor tiene un volumen total líquido de 1920 litros (64* 30).

$$1920 = \frac{3}{4} * V_T \rightarrow V_T = 2560 L = 2,56 m^3$$

Teniendo en cuenta que no conocemos con seguridad los datos de la cantidad de biomasa disponible, se va a utilizar un factor de seguridad de 1,2 sobre el resultado final:

$$2,56 * 1,2 = 3,072 m^3 \rightarrow \text{El volumen total del biodigestor es } 3 m^3$$

Para obtener el radio y la altura del depósito se usan la formulas mostradas en la ilustración 19.

<i>Medida</i>	<i>Valor</i>
Radio básico (R)	0,95 m (se aproximará 1m por simplicidad)
Unidad (U)	1/4
Altura de la cúpula (hc)	0,5 m
Altura de la pared (hp)	0,75 m
Altura del cono base (ht)	0,3 m

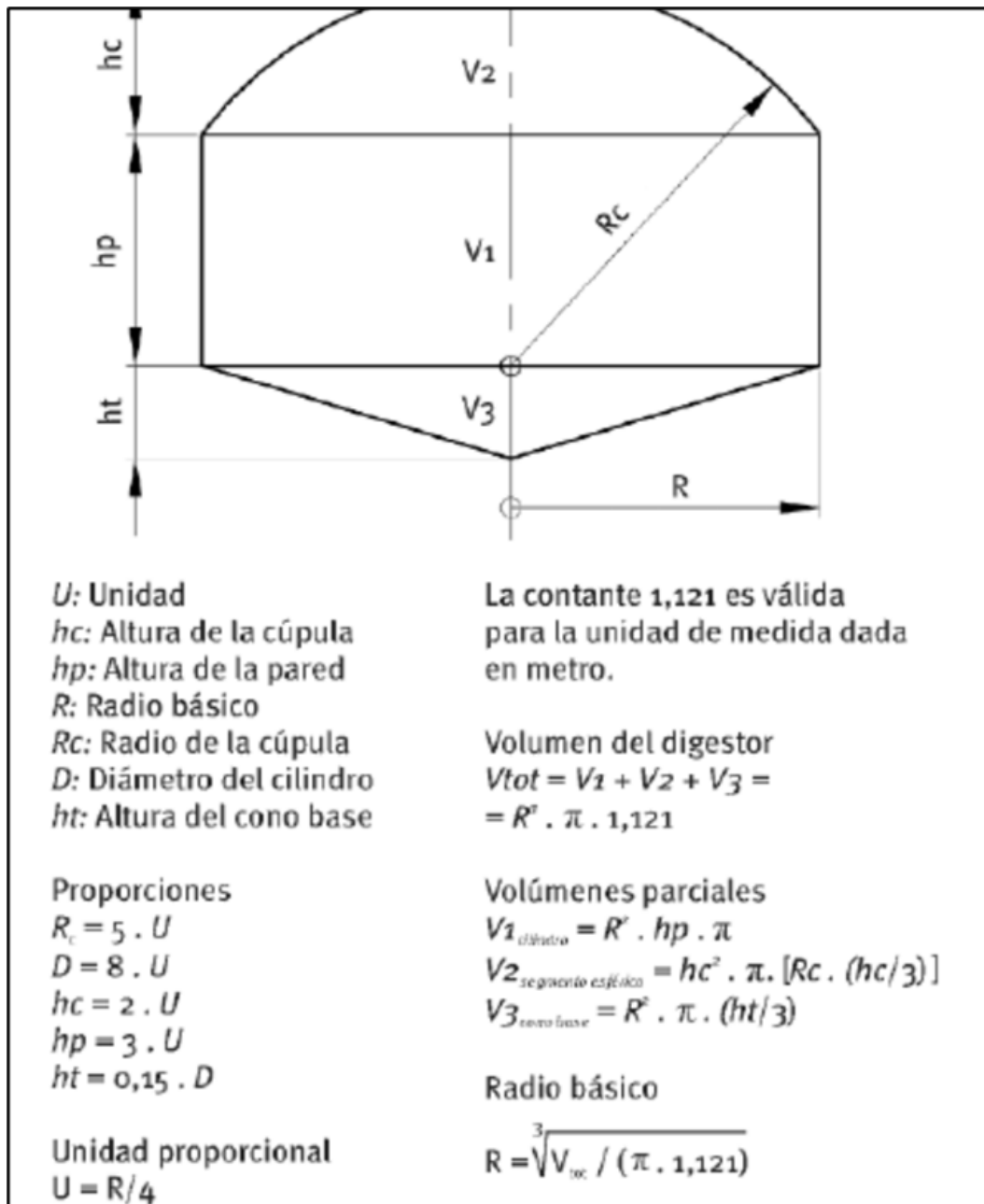


Ilustración 19. Partes de un biodigestor de cúpula fija

5.2.3 PLANO DEL BIODIGESTOR

A continuación se muestran un plano del biodigestor con las cotas en mm. Se observa que el depósito de carga está por encima del nivel de tierra, y el depósito de descarga por debajo. También hay diferencia en el grado de inclinación de las tuberías que conectan ambos depósitos, siendo el de la tubería de cara más empinada. El grado de inclinación y la altura del depósito están diseñadas de esta manera para favorecer el flujo natural de la materia orgánica y del biosólido resultante.

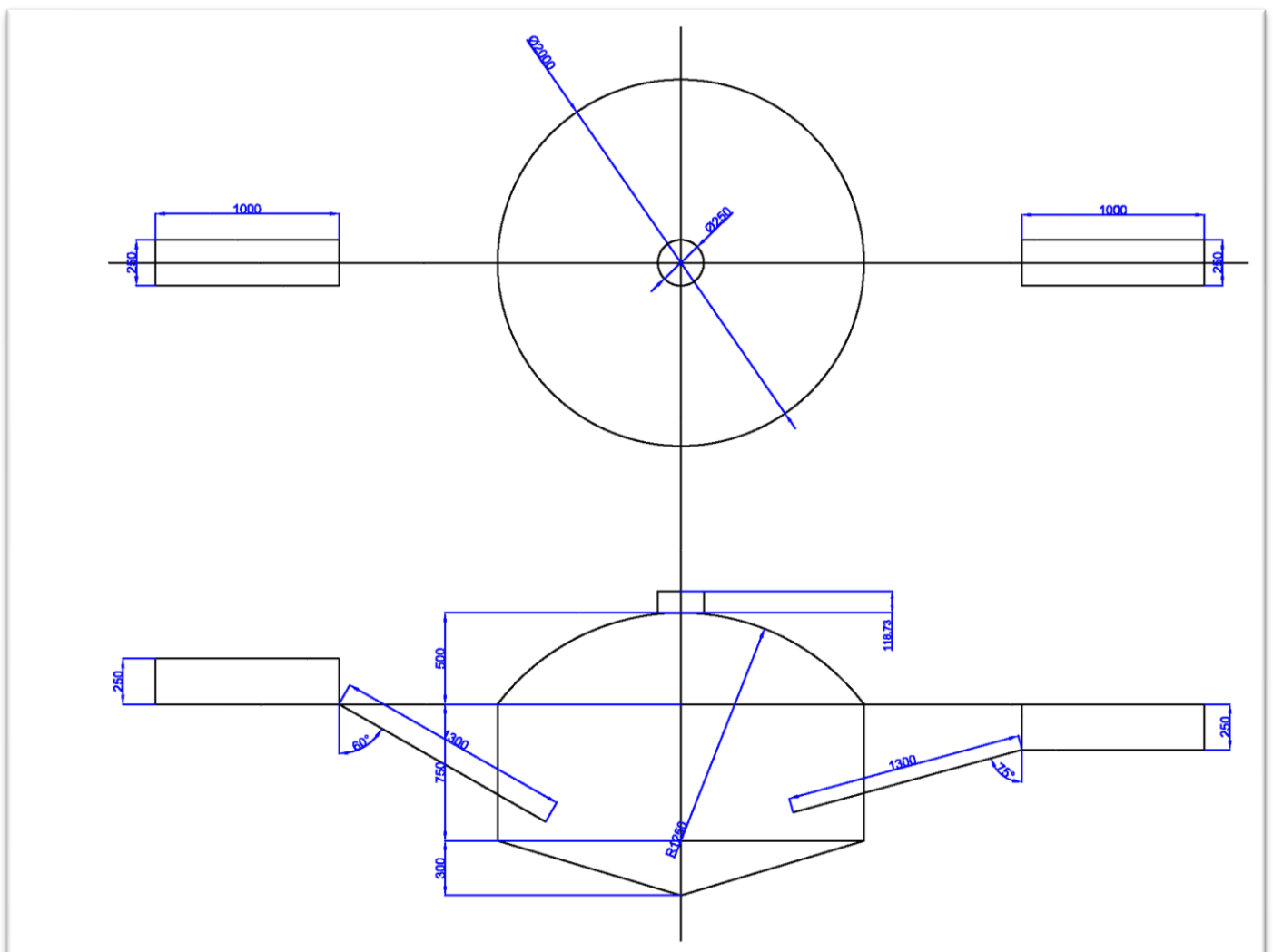


Ilustración 20. Planta y alzado del biodigestor

Capítulo 6. CONSTRUCCIÓN, PUESTA EN MARCHA Y MANTENIMIENTO

En el capítulo anterior se han obtenido todas las medidas necesarias para la construcción de la estructura del biodigestor. En este capítulo se pretende seguir con el orden natural de cualquier construcción, siguiendo paso a paso el desarrollo de esta. Seguido por la puesta en marcha del biodigestor. Un biodigestor tarda un determinado periodo de tiempo en empezar a producir biogás y es importante realizar de manera correcta las primeras cargas. Por último, se va a explicar cómo se debe realizar el mantenimiento de la estructura y cómo resolver los fallos más comunes. Este último apartado es importante, ya que, uno de los primeros diseños de biodigestor que se implantaron en Dotito fracasó debido a un incorrecto mantenimiento de este.

Los documentos usados para obtener la información, tablas e ilustraciones de este capítulo son: “*Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas. José Antonio Guardado Chacón. 2007*” [15] (CHAC07), “*Manual técnico: La experiencia de construcción y uso de biodigestores para producción energética en Copan y Lempira. Comisión de Acción Social Menonita. 2011*” [17] (MENO11), y “*Diseño de un biodigestor anaerobio para el tratamiento de los residuales sólidos del procesamiento cárnico. Yans Guardia-Puebla, Yoandro Rodríguez-Ponce, Osmir Benítez-Quintero. 2017*” [18] (GUAR17).

6.1 PLAN DE CONSTRUCCIÓN

En este apartado se explica paso a paso el proceso de construcción del biodigestor, desde la excavación de la fosa hasta la colocación de válvulas de control. Hay que tener en cuenta que no se conoce con exactitud los datos y durante el proceso de construcción se pueden realizar modificaciones.

1. Localización de la estructura

La localización del biodigestor debe contar con las siguientes características. El lugar debe estar suplido con luz solar durante todo el día, o la mayor parte del día. Esto permite que sea más fácil alcanzar altas temperaturas y las bacterias puedan reaccionar con mayor facilidad. El terreno donde se construya la planta debe estar un poco más bajo que la cocina donde se va a usar el gas para que este viaje con mayor facilidad por las tuberías. Aunque al construirse la estructura semienterrada, esto se da por asumido.

El biodigestor también debe estar cerca de los establos de donde se va a obtener la materia orgánica. Y, por último, el biodigestor no debe estar muy cerca de la cocina; porque si hay niños que jueguen en la casa, podrían estar en peligro. Tampoco debe estar muy lejos de la casa, porque esto supondría un mayor gasto en tuberías.

2. Excavación de la fosa

El primer paso de la construcción del biodigestor es la excavación de la fosa. El volumen total de la fosa es equivalente al volumen total del gas almacenado hallado en el capítulo anterior más el grosor de los ladrillos que se vayan a utilizar. Es recomendable dejar un lateral del biodigestor accesible para poder medir las características de mantenimiento. Algunas características, como la temperatura y el PH, son necesarias medirlas en la parte superior (donde está el gas) y en la parte inferior (donde se encuentra la materia orgánica). Es por esto por lo que la parte inferior del biodigestor debe tener acceso desde el exterior y la fosa que rodea a la estructura debe ser de mayor tamaño.

Al estar semienterrado, el biodigestor tiene un mayor aislamiento y consigue que el flujo de gas ascendente tenga una mayor facilidad a la hora de transportarse.

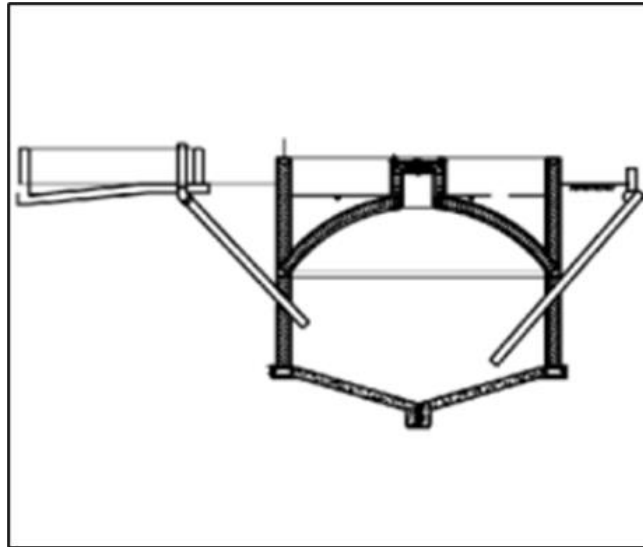


Ilustración 21. Esquema del biodigestor sobre el nivel del terreno

Al excavar la fosa hay que tener en cuenta que la tubería de entrada y de salida también van a ir por debajo del nivel de la tierra. Esto se observa en la ilustración 20.

3. Construcción de la estructura

Lo primero que se tiene que construir es la losa de cimentación. Esta losa es el suelo de la estructura, que se va a encargar de soportar todo el peso del biodigestor. La losa será de hormigón y su fundición tiene que hacerse en un solo día para que la estructura sea más resistente. Se fundirá la losa del centro hacia fuera del círculo. También se pondrá un eje central, que servirá como guía a la hora de construir la estructura.

A continuación, se construirá el muro cilíndrico, que estará compuesto de ladrillos. Hay que dejar el espacio para la tubería de entrada y de salida. También hay que tener en cuenta que el muro debe contar con cuatro salidas pequeñas al exterior para la colocación de los dos termómetros, y para la comprobación del PH. Estos agujeros serán del tamaño de los aparatos y deberán estar cerrados con una goma para evitar salidas de gas.

Después, se construye la viga de cerramiento. Esto sería el techo del depósito, que separa la parte cilíndrica de la parte esférica del digestor. Está hecha de hormigón armado.

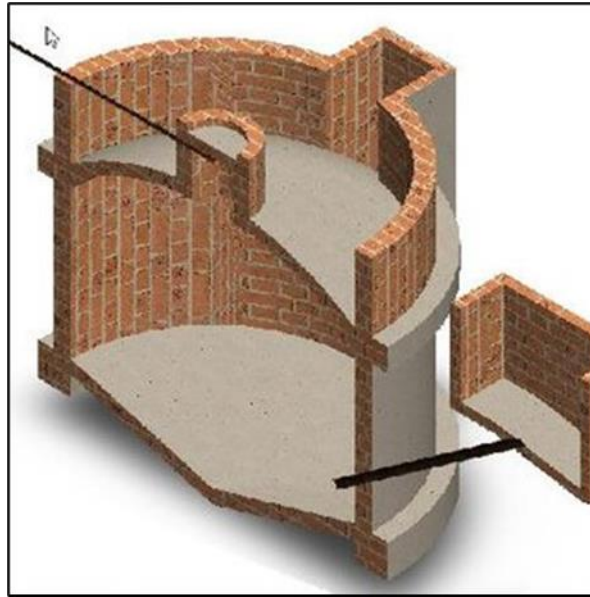


Ilustración 22. Esquema de la estructura del biodigestor

Se prosigue la construcción con la cúpula. Se irán colocando los ladrillos siguiendo un radio que será señalado por una formaleta. Cuando la curvatura sea muy elevada y los ladrillos se desprendan, se utilizarán los ganchos de sujeción para seguir con la construcción. Se vuelve a instalar una viga de cierre, esta vez como cierre de la cúpula y dejando el espacio necesario para el cuello del biodigestor. También estará hecho de hormigón armado.

Por último, se construye el cuello de la estructura. Este está compuesto por ladrillos y tiene dos partes separadas por tapas herméticamente cerradas. La primera tapa se encarga de cerrar herméticamente el biodigestor, mientras que la segunda impide la evaporación del agua que recubre la arcilla que está sobre la primera tapa. Las tapas están hechas de hormigón mezclado con arena, y cuentan con una malla de alambre por encima como refuerzo.

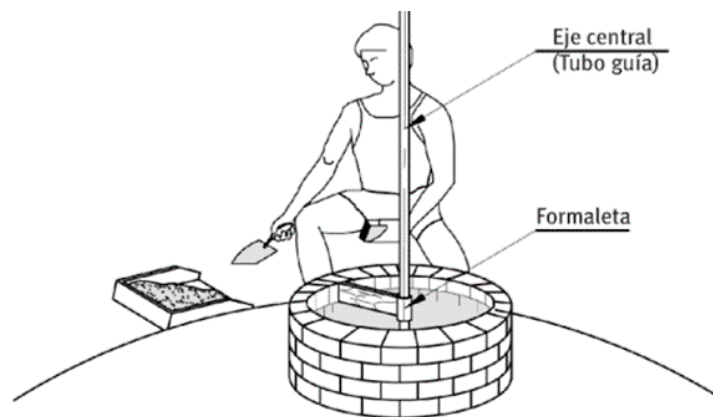


Ilustración 23. Construcción del cuello del biodigestor

Durante la construcción de la estructura hay que recubrir las paredes del interior del tanque con pintura impermeable que eviten que se dañen los ladrillos durante las reacciones químicas y proteja térmicamente el digestor.

4. Instalación de los tubos de salida del gas, de carga y descarga

Los tres tubos estarán hechos de PVC. El tubo de salida de gas se introducirá en el biodigestor por el cuello de este. Se utilizará una arandela por dentro para que no deje escapar el gas y otra por fuera para fijar bien el tubo.

Los tubos de carga y descarga tienen que ser más anchos que el de la salida de gas, e irán introducidos dentro del tanque sobresaliendo un poco en el interior. El tubo de carga conecta el depósito de carga, donde se va a introducir el estiércol, con el depósito. El tubo de descarga conecta el depósito con la salida del biosólido que se utilizará como fertilizante. El tubo de descarga debe tener menos ángulo respecto a la horizontal que el tubo de carga, para facilitar el movimiento de la mezcla.

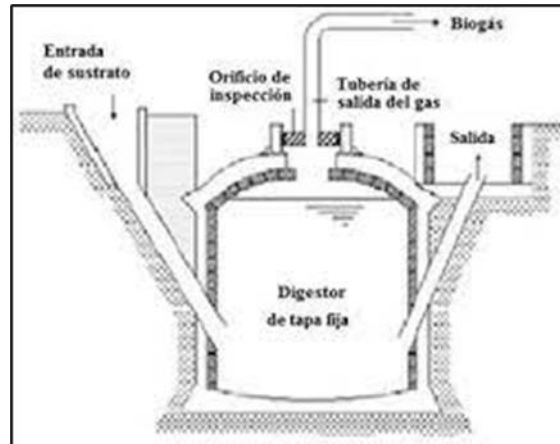


Ilustración 24. Esquema del biodigestor y los tubos de salida de gas, de carga y descarga

5. Construcción de depósitos de carga y descarga

Se construirán ambos depósitos con ladrillos, de igual manera que el tanque. Deben tener una tapa para evitar que se creen ecosistemas de insectos. El depósito de descarga debe estar a menor altura que el depósito de carga, para facilitar el movimiento del flujo de la mezcla.

6. Válvulas

El objetivo de las válvulas es controlar el paso del gas. Se construirán un total de cuatro válvulas, tres de control y una de liberación de agua.

La primera válvula va pegada a la salida de gas del biodigestor. Se construirá un codo que hará que el gas fluya de manera horizontal, tras el codo, la primera válvula de control. Su objetivo es controlar el flujo de gas saliente.

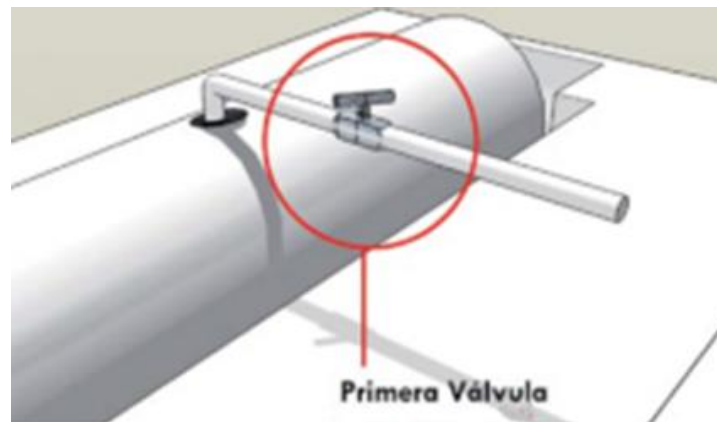


Ilustración 25. Primera válvula de control

A continuación, se coloca una T invertida en la tubería como se observa en la ilustración 25. Esta T tiene como objetivo liberar el gas si se produce demasiada presión en el sistema. En la salida de la T se colocará un recipiente con agua donde la tubería estará sumergida.

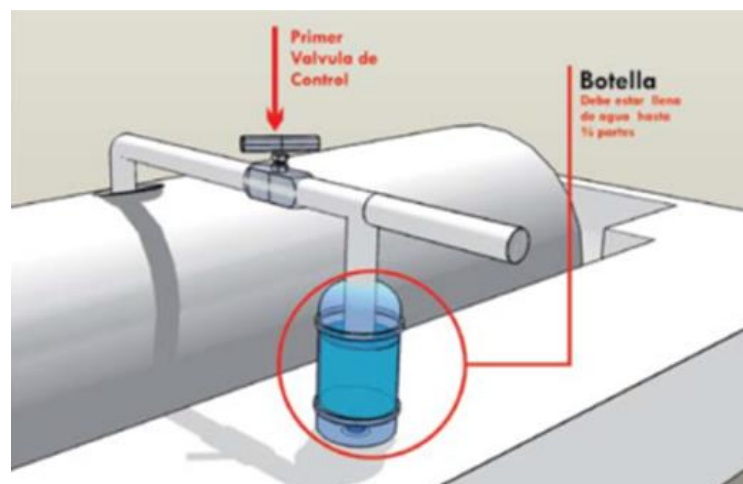


Ilustración 26. Ejemplo de la tubería en T

Después de la T estará situada la segunda válvula, estará en el punto más bajo de la línea y su objetivo es drenar la posible agua que se condense en el sistema. Esta válvula se conoce como la válvula de liberación de agua. Es importante no abrir la válvula de liberación de agua a la vez que la primera válvula de control, ya que esto supondría la pérdida del gas del interior del biodigestor.

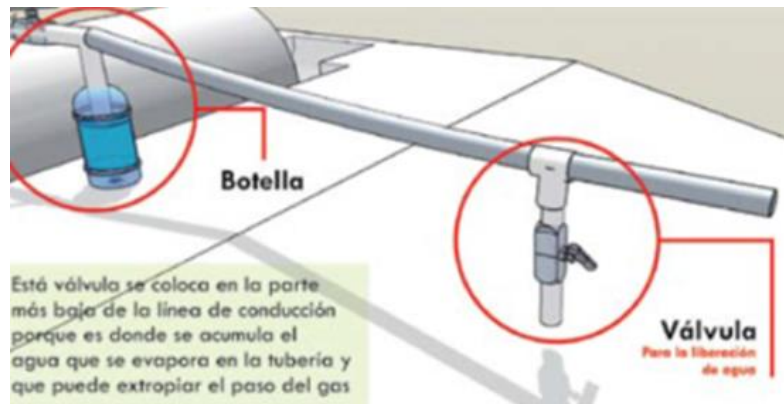


Ilustración 27: Primera válvula de control y válvula para la liberación del agua

La última válvula de control estará situada justo antes de la estufa que se va a usar para cocinar. Su objetivo es proteger de la salida de gas en el caso de que la estufa no funcione correctamente.

Existe una tercera válvula de control justo antes de la tubería con la trampa de ácido sulfhídrico. Esta válvula será explicada con mayor detalle en el siguiente apartado.

7. Trampa de ácido sulfhídrico

El biogás puede contener ácido sulfhídrico (H_2S) en pequeñas cantidades. Este ácido sulfhídrico mezclado con agua puede crear ácido sulfúrico que es corrosivo.

Aunque las posibilidades de que se forme ácido sulfúrico son pequeñas, y el ácido sulfhídrico solo es dañino en grandes cantidades; se debe poner trampas para este compuesto como medida de prevención. Las trampas consisten en mallas de hierro oxidado, que dejan pasar el gas, pero no el ácido³. Se instala esta malla en un tramo de tubería extraíble, y que cuenta con una válvula de control justo delante. La tubería extraíble se coloca en un tramo de la tubería cercano a la cocina, para que sea más fácil de cambiar. Cuando sea necesario cambiar el filtro, se debe cerrar la válvula de control 3 y extraer la tubería. [19] (SANT20)

³ La malla de hierro no deja pasar el ácido debido a que el ácido sulfhídrico en presencia de hierro precipita como azufre, y el hierro se oxida a hierro III [19]

6.1.1 MATERIALES NECESARIOS

A continuación, se listan los materiales necesarios para la construcción del biodigestor. Las cantidades listadas son las necesarias para la construcción, pero es recomendable conseguir más para prevenir desperfectos. También se debe tener en cuenta de que, aunque los materiales son bastante simples, existe la posibilidad de que no se consigan todos ellos. Si este fuese el caso, se pueden utilizar herramientas/materiales similares para la construcción. [15] (CHAC07)

Construcción de la estructura:

- Cemento = 30 kg
- Hormigón = 10 kg
- Arena = 2 m²
- Grava (piedras) = 2 kg
- Bloques de ladrillo de cerámica (18x18x13 cm) = 235 ladrillos
- Bobina acero 1/4 = 44 kg
- Puntilla (clavos) = 1 kg
- Pintura impermeable
- Malla de alambre
- Material aislante para la inserción de los termómetros

Para el suelo del biodigestor se va a usar hormigón. Para las paredes se usarán los ladrillos de cerámica, parte del cemento y de la grava. La cúpula estará hecha de cemento, arena y grava, más específicamente de una mezcla de todos los materiales. El acero, la puntilla, y el hormigón se utilizarán para cerramientos y la cimentación. Los tanques de carga y descarga estarán hecho de ladrillos, cemento y grava.

Construcción tuberías

- Tantos codos como sean necesarios para la tubería (mínimo uno a la salida del biodigestor)

- Una T para la salida del agua
- 1 filtro de ácido sulfhídrico (malla metálica y tubería extraíble)
- 2 tuberías de PVC de 1,3m de largo y 25 cm de diámetro (Para las tuberías de carga y descarga)
- Tuberías de unión de PVC
- 4 válvulas de paso
- 4 llaves de paso
- Tuberías de PVC de 10 cm de diámetro para la salida del gas (no se sabe la cantidad)

Herramientas para la construcción

- Palas para la excavación
- Guía rectangular (para la construcción del biodigestor, se pueden usar listones de madera)
- Eje central de madera para guía de la construcción
- Ganchos de sujeción para la construcción de la cúpula

Herramientas para el mantenimiento

- Flujómetro (permite medir el gas utilizado, se colocará cerca de la cocina)
- Manómetro (permite medir la presión del gas en la tubería)
- Dos termómetros metálicos
- Medidor de PH

6.2 PUESTA EN MARCHA

La puesta en marcha de un biodigestor es un proceso largo, que supone varios días. Como se ha visto en capítulos anteriores, el biodigestor diseñado va a tardar aproximadamente 30 días en empezar a producir gas.

Una vez acabada la construcción del digestor, y una vez comprobados todos los parámetros de seguridad (válvulas correctamente instaladas, tanque sellado de manera satisfactoria, etc), se puede proseguir a alimentar el digestor por primera vez.

La primera carga es diferente al resto. Las bacterias encargadas de producir la reacción anaeróbica y convertir la materia orgánica en gas son las bacterias metanogénicas. Estas bacterias se encuentran en ecosistemas donde no hay oxígeno, como en zonas de bosques y praderas, o en el intestino de una persona. Para poner en marcha un biodigestor es importante que la primera carga cuente con un elevado número de este tipo de bacterias. Para conseguir las bacterias se van a utilizar lo que se conoce como “lodos activos”, que es el biosólido que se extrae de un biodigestor una vez habiéndose producido la digestión anaeróbica. Es decir, para poner en marcha el biodigestor es recomendable encontrar otro biodigestor activo, y utilizar el fertilizante que se extrae, como primera carga. Otro tipo de materia orgánica que tiene un gran número de bacterias metanogénicas son los residuos que se obtienen en una planta de depuración de aguas residuales. Si se pudiese acceder a este tipo de planta, se podrían usar estos residuos como primera carga. Otra característica de la primera carga es que tiene que ser más líquida que el resto. Se debe alimentar con lodos activos y una gran cantidad de agua. Si se metiese mucha materia orgánica en los primeros días, podría ocurrir que la mezcla del tanque fuese demasiado ácida. [20] (ACUÑ11)

Antes de introducir la primera carga en el tanque de carga se debe realizar el sellado de agua. El sellado de agua consiste en introducir agua en el interior del depósito de manera que cubra la boca de los tubos de carga y descarga. Se sabrá que se ha llegado al nivel correcto de agua cuando se alcance el nivel de salida de la tubería del depósito de descarga (Ilustración 27).

Este sellado permite que no escape gas por las tuberías y que no entre oxígeno al interior (la entrada de oxígeno entorpecería la reacción anaeróbica).

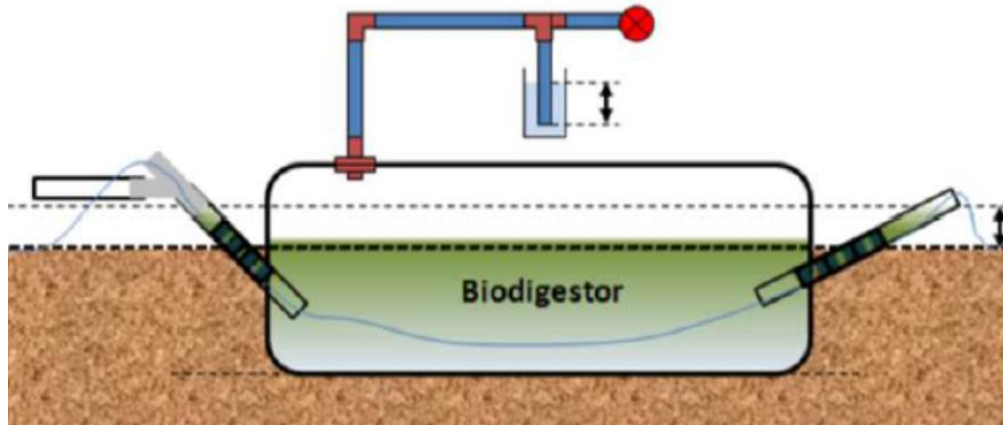


Ilustración 28. Demostración de sellado de agua [19]

Durante los siguientes días se realizará la carga diaria de mezcla. Se aconseja que la carga se realice todos los días a la misma hora, por motivos de rutina. Ya que a niveles prácticos no es necesario que sea siempre a la misma hora. A continuación, se muestra un esquema de las cargas del biodigestor durante el primer mes⁴:

Día 1 → Se realiza el sellado de agua dentro del biodigestor y se introduce la primera carga compuesta en su mayor parte de lodos activos.

Día 2 → Se alimenta el biodigestor con la misma cantidad de mezcla que el día anterior

Día 3-20 → Se sigue alimentando el biodigestor diariamente, en este caso con la carga diaria calculada de materia orgánica (64kg). Se puede introducir más carga si se considera necesario

Día 21-27 → Se debe estar empezando a formar el gas dentro del biodigestor. Debería empezar a salir biosólido por el tanque de descarga.

⁴ Los días son orientativos y no se debe hacer un seguimiento de estos literal

Día 27 → Se pueden hacer pruebas de la salida de gas del biodigestor para ver si hay gas.

Día 28-30 → Se siguen haciendo pruebas diarias para ver si se ha conseguido producir gas. Se debería conseguir una salida de gas permanente

6.3 MANTENIMIENTO

El correcto mantenimiento del biodigestor es un proceso necesario para que este funcione correctamente durante toda su vida estimada. Existen tres tipos de características que hay que revisar con regularidad. El primer tipo son las características químicas del interior del biodigestor, niveles de pH, temperatura, etc. El segundo tipo son las características físicas del biodigestor, fallos en la estructura, comprobación del filtro de ácido sulfhídrico, etc. Y, por último, se debe estar preparado ante aquellos factores externos al biodigestor, como eventos medioambientales.

Lo más importante es asegurarse de que los valores del pH, temperatura y presión del gas y la mezcla de agua y materia orgánica son los adecuados. Los valores numéricos correctos de estos factores y el cómo corregirlos se encuentran en el apartado *4.1.2 Posibles factores químicos y físicos para tener en cuenta*. Para comprobar la temperatura se utilizarán los dos termómetros introducidos en la estructura; uno medirá la temperatura de la mezcla, el otro la temperatura del gas. Para medir el pH se utilizará un medidor de pH que se introducirá en la parte inferior y superior del tanque. Para medir la presión del gas se utilizará el manómetro. En lo que respecta a la presión del gas, si la presión es muy baja puede que haya alguna fuga en la estructura, habrá que revisarla y sellar la fuga. Por el contrario, si la presión es alta, habrá que desalojar parte del gas mediante las válvulas de control.

En lo referente al mantenimiento de la estructura, hay que estar alerta de si se produce algún tipo de fuga en la estructura, del correcto funcionamiento de las válvulas, y de que no se produzcan obstrucciones en las tuberías. Este tipo de características se pueden revisar en intervalos de tiempo más largos que los factores químicos, ya que si algo estuviese

funcionando de manera incorrecta sería más fácil alertarse porque la producción del gas sería inconsistente/ defectuosa. Alguna de estas características se revisa de la siguiente manera:

En lo que respecta a la trampa de ácido sulfhídrico, hay que cambiar el filtro de la trampa con regularidad. Sabremos que hace falta cambiar la malla metálica cuando aparezca un olor a podrido cerca de la tubería que contiene la trampa. Para cambiarla solo hará falta extraer la parte de la tubería extraíble y cambiar la malla, siempre cerrando la válvula de control previa a este tramo.

En lo que respecta a la purgación de la tubería, si el gas comienza a salir de manera no uniforme, puede significar que el agua se está condensando dentro de la tubería. Para solucionar este problema, se debe purgar la tubería mediante la válvula de liberación del agua.

Por último, habrá que estar pendiente si las condiciones climáticas dañan el digestor o si existe algún peligro en las inmediaciones de la estructura. La parte de la estructura que no está enterrada es más vulnerable a los factores humanos. Habrá que asegurarse que el conjunto de tuberías está correctamente instalado y no está expuesto a peligros. Este tipo de peligros pueden ser el paso de animales o de niños.

6.3.1 POSIBLES PROBLEMAS EN EL MANTENIMIENTO

A continuación, se lista las dificultades más comunes y el cómo resolverlas:

1. Que se produzca un descontrol en la alimentación del digestor. Lo más fácil para que esto no suceda es alimentarlo todos los días a la misma hora y cantidad de estiércol.
2. Que no se produzca gas. Es posible que haya algún escape de gas. Habría que encontrar el escape y sellarlo.
3. El biodigestor está mal alimentado. El biodigestor producirá poco gas o lo hará de manera irregular. Para solucionar este problema habrá que vaciar el depósito de carga y volver a cargarlo. Si se dispone de zumo de fruta se podría añadir a la mezcla ya

que el zumo de frutas, en particular el de pomelo, ayuda a activar las bacterias mesófilas.

4. El gas no pasa del biodigestor a la estufa. Lo más probable es que se debe a que hay agua en la tubería, habría que purgarla

Capítulo 7. PLAN ECONÓMICO Y AHORRO ENERGÉTICO

Este capítulo se desarrolla en torno al presupuesto, el gasto y el ahorro que supone implantar el biodigestor. Primero se va a realizar una estimación económica de lo que cuesta construir el biodigestor teniendo en cuenta todos los materiales necesarios. Después, se va a comparar el ahorro de usar un biodigestor frente a lo que se gastaría usando gas natural en España.

7.1 PLAN ECONÓMICO

En este apartado se va a realizar una estimación del coste total del biodigestor. Se van a sumar los costes de los materiales de construcción de la estructura, los costes de los materiales de las tuberías, los costes de las herramientas necesarias, y los costes de las herramientas de mantenimiento.

Para obtener los precios se han utilizado los precios e España de las empresas del Leroy Merlin, Amazon y Alibaba. Aunque los precios en Zimbabue no son los mismos que en España, estos valen para hacer una estimación aproximada.






A continuación, se observa una tabla con los costes de los materiales listados en el apartado 6.1.1. Se añade también una imagen para que se tenga un mejor entendimiento del tipo de material que se necesita.⁵

⁵ Para la trampa de ácido sulfhídrico se van a usar parte de la tubería de 15cm, dos de las uniones de tuberías y parte de la malla metálica como filtro.

MATERIALES	IMAGEN	PRECIO
Costes materiales construcción estructura		
Cemento		3€ / Kg 60€ (Leroy Merlin)
Hormigón		3€ / 25 Kg 2 € (Leroy Merlin)
Arena		5,49€/25 Kg (Leroy Merlin)
Ladrillos cerámica		0,8€ / unidad 188€ (Leroy Merlin)
Acero (alambre)		3,19€ / 50m (Leroy Merlin)

Puntilla		1,74€ / 100 unidades (Leroy Merlín)
Pintura impermeable		20€ / 4 litros (Leroy Merlín)
Malla alambre		46€ / 25m (Leroy Merlín)
Costes materiales tuberías		
T		2,59€ /unidad (Leroy Merlín)
Codos		1,69€ / unidad 8,45€ (Leroy Merlín)

Tubería 25cm diámetro		12€ / 25m (Leroy Merlín)
Tubería 15 cm diámetro		6€ / 25m (Leroy Merlín)
Unión tuberías (macho y hembra)		3,39€/unión 33,9€ (Leroy Merlín)
Válvulas		4€ / unidad 16€ (Leroy Merlín)
Llave de paso		6€ /unidad 24€ (Leroy Merlín)
Coste herramientas para construcción		
Pala		15€ /unidad (Leroy Merlín)

<p>Guía rectangular (listón madera 21x67mmx2m)</p>		<p>9€/unidad 27€ (Leroy Merlin)</p>
<p>Ganchos de sujeción</p>		<p>10€ / 100 unidades (Amazon)</p>
<p>Coste herramientas para mantenimiento</p>		
<p>Flujómetro</p>		<p>20€ (Amazon)</p>
<p>Manómetro</p>		<p>139€ (Amazon)</p>
<p>Termómetros metálicos</p>		<p>13€/unidad 26€ (Amazon)</p>

Medidor pH		14€ (Amazon)
Cocina biogás		76€ / 2 fuegos (Alibaba)

A todos los costes anteriores hay que añadirle la mano de obra. Para la construcción de la estructura se van a necesitar 2 o 3 personas que trabajen durante 3 días (aproximadamente). En España el sueldo de este tipo de trabajo es de 7€/ hora. Suponiendo que trabajan 8 horas, el coste total de la mano de obra es de $7 \times 3 \times 3 = 63€$.

El coste total teniendo en cuenta todos los materiales y la mano de obra asciende a 796,96€. Al estar en Zimbabue y tratarse de un proyecto de voluntariado, la mano de obra saldría más barata que en España, incluso pudiendo llegar a ser gratis. Y la arena no haría falta comprarla ya que se podría obtener del suelo. El coste total sin tener en cuenta estas especificaciones es de 727,47€. Por lo que la estimación de precio total del proyecto es entre 700-800€.

7.2 AHORRO ENERGÉTICO

En este apartado se realiza una comparación de lo que gastaría una familia española cocinando con dos fuegos alimentados de gas natural frente a lo que se gasta con el biodigestor. Los datos utilizados para calcular precio del gas en España son de julio 2022.

Para los datos y las tablas del apartado se utiliza la página web *precio gas.com*. [21]

En apartados anteriores hemos definido que la cantidad de gas natural que se va a utilizar diariamente es 450 litros de gas, por lo que hay un consumo de 150L / hora = 0,15 m³ / hora. Sin embargo, la unidad del consumo energético del gas natural es kilovatio hora (kWh). Para convertir los m³ a kWh se va a utilizar un factor de conversión fijado por la empresa Enagás y calculado según el poder calorífico del gas⁶ y la publicación respectiva en el Boletín Oficial del Estado. El factor de conversión utilizado es que cada m³ equivale a 11,70 kWh. A continuación, se calcula la cantidad de gas natural en kWh que se consume con el biodigestor.

$$0,45 * 11,7 = 5,265 \text{ kWh}$$

El consumo promedio de gas natural en una casa española donde el gas solo se utiliza para cocinar es de 13,7 kWh al día. Para calcular el ahorro se van a utilizar los datos de consumo de Zimbabue con los que se ha estado trabajando durante todo el trabajo.

El precio del kWh depende en función de la compañía que provee el gas y del tipo de tarifa que tenga la casa. El tipo de tarifa que se aplica en cada casa no depende de los usuarios, sino que es asignada por las compañías.


						
Tarifa	Plan Gas Hogar	Tarifa Digital Gas	Gas Y Más	One Gas	A Tu Aire Gas	TUR *
RL.1	0.1580 €/kWh	0.1104 €/kWh	0.1399 €/kWh	0.1478 €/kWh	0.1180 €/kWh	0.0531 €/kWh
RL.2	0.1660 €/kWh	0.1419 €/kWh	0.1399 €/kWh	0.1413 €/kWh	0.1150 €/kWh	0.0497 €/kWh
RL.3	0.1655 €/kWh	0.1418 €/kWh	-	0.1393 €/kWh	0.1120 €/kWh	0.0471 €/kWh

Tabla 6. Precios del kWh en España

⁶ El Poder Calorífico del gas no es siempre igual, varía según los elementos de hidrógeno y carbón en el gas

Se realiza una media entre todos los precios de la tabla y se obtiene que el precio del kWh es de 0,1227€ / kWh. Se concluye así que el precio diario que se paga usando gas natural es 0,656€ / día.

$$5,265 \text{ kWh} * 0,1227\text{€/kWh} = 0,646\text{€} / \text{día}$$

La energía consumida en el biodigestor no tiene ningún coste, ya que se obtienen a partir del estiércol. Para calcular la diferencia económica entre ambos combustibles se va a utilizar el coste del proyecto de construcción del biodigestor. Y se va a considerar el coste del gas natural como una función lineal. En la gráfica siguiente se observa esta comparación.

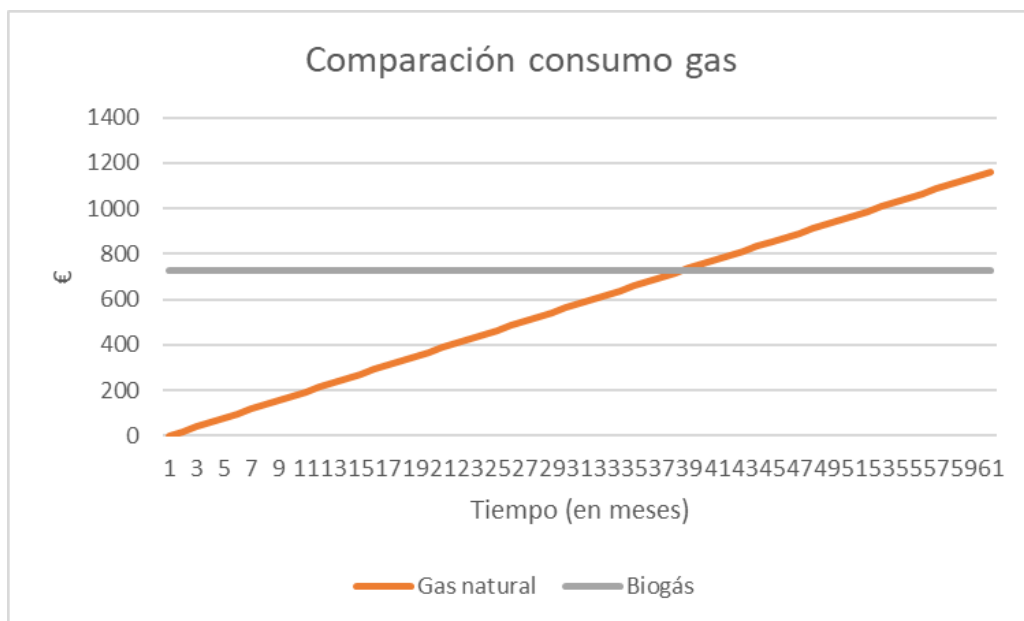


Ilustración 29. Comparación del consumo económico del gas

El tiempo que se tarda en amortizar el biodigestor es 37,54 meses, lo que es equivalente a 3,12 años. Este es el tiempo que tarda el biodigestor en salir económicamente más rentable que el uso de gas natural. En el apartado 4.2.1 *Diferentes ejemplos de biodigestores* se mencionaba que la vida de un biodigestor de campana fija es de 15-20 años. Lo que significa que el ahorro económico que se consigue al utilizar el digestor es de 2760-3923€ en total.

Un biodigestor es más rentable económicamente que la utilización de gas natural si este consigue superar los tres años y medio de vida. Y puede llegar a ahorrarse grandes cantidades de dinero si el biodigestor se mantiene de manera correcta y tiene una vida de uso larga. Se concluye que el biodigestor no solo es mejor alternativa que el gas natural porque produce energía renovable que no contamina, sino que también es mejor económicamente.

ECUACIONES UTILIZADAS

Para el cálculo del mes donde el consumo de biogás y gas natural es igual:

$$\text{Consumo gas natural} = 19,38 \text{ €/kWh} * \text{número de mes correspondiente}$$

$$\text{Consumo de biogás} = 727 \text{ €/kWh}$$

$$727 = 19,38 * \text{mes} \rightarrow \text{mes} = 37,54 \rightarrow \text{año} = \mathbf{3,13 \text{ años}}$$

Para el cálculo del ahorro total:

Ahorro si la vida útil del biodigestor son 15 años

$$\rightarrow 15 \text{ años} * 12 \text{ meses} * 19,38 \text{ €/mes} - 727,47 = \mathbf{2760,93 \text{ €}}$$

Ahorro si la vida útil del biodigestor son 20 años

$$\rightarrow 20 \text{ años} * 12 \text{ meses} * 19,38 \text{ €/mes} - 727,47 = \mathbf{3923,73 \text{ €}}$$

Capítulo 8. CONCLUSIONES

El principal objetivo del trabajo es diseñar un biodigestor para hacer frente a la actual crisis energética de Dotito. Mediante la construcción del biodigestor diseñado se podrá abastecer una cocina para una familia media. De esta manera se cumple el objetivo más importante.

Existen otros objetivos que también han sido satisfechos durante el desarrollo del proyecto. Uno de estos objetivos es el de educar y enseñar a la población el cómo construir y mantener un biodigestor. En capítulos anteriores se han analizado diferentes tipos de biodigestores, con sus ventajas y desventajas. De todas las opciones se seleccionó el biodigestor continuo de campana fija como el más adecuado para la situación de Dotito. El digestor diseñado es de tamaño pequeño, pero los biodigestores de campana fija pueden ser más grandes y abastecer demandas más altas. Con el diseño actual y las ecuaciones obtenidas, se pueden cambiar los parámetros para construir más digestores en el futuro y así conseguir una fuente de energía más en la zona rural.

Otro objetivo que se ha conseguido es el de entender mejor a sociedades diferentes a la occidental. Durante el desarrollo del trabajo se ha conseguido comprender mejor la realidad actual del país de Zimbabue, los problemas a los que hace frente su población y se ha buscado una solución a estos problemas. También se ha comprendido el funcionamiento de un biodigestor y el cómo diseñarlo. Un biodigestor es una fuente de energía verde que no conlleva un coste muy elevado, lo que lo hace ideal para países como Zimbabue.

Po último, para proyectos futuros, aparte de la construcción de más digestores más grandes en Dotito, se plantea el biodigestor como solución para problemas de saneamiento. Con toda la información aprendida se ha comprendido que existe un problema global de saneamiento. *“Aproximadamente 829 000 personas de países de ingresos bajos y medianos mueren cada año como consecuencia de la insalubridad del agua y de un saneamiento y una higiene deficientes”*. [22] Estas personas mueren porque no tienen acceso a servicios básicos de saneamiento y defecan al aire libre, tirando los excrementos al agua de donde beben. Si se

consiguiese hacer algo con esos excrementos, se podría ayudar con esta crisis. Los biodigestores son una propuesta para lidiar con los desechos humanos en países en vías de desarrollo. Aunque el biodigestor diseñado se alimenta con excrementos animales, se podría valorar la opción de utilizar excrementos humanos. La situación del proyecto no era favorable para este tipo de biodigestor, pero para un futuro se podría valorar la alternativa.

Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [GOME19] M. Gómez, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible,» 30 agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
- [2] «National Biodigester Programme,» 2020. [En línea]. Available: <http://nbp.org.kh/>. [Último acceso: 12 febrero 2022].
- [RUIZ20] L. Ruíz Llorente, «Diseño e implantación de un biodigestor para la comunidad rural de Kazai, Zimbabue,» Universidad Pontificia de Comillas, ICAI, Madrid, 2020.
- [RODR21] D. Rodríguez García, «Diseño, desarrollo e instalación de un digestor anaeróbico en Zimbabue para la conversión de desechos en gas natural,» Universidad Pontificia de Comillas, ICAI, Madrid, 2021.
- [MUNH13] P. m. a. C. Munhande, «Zimbabwe's Socialist development experiment 1980-1989,» de *IOSR Journal Of Humanities And Social Science*, iosr journal, 2013, pp. 63-68.
- [6] «Elmundo.es,» [En línea]. Available: <https://www.elmundo.es/internacional/zimbabue/historia.html>. [Último acceso: 15 abril 2021].
- [7] «internationalmonetaryfund,» 2012.

- [8] «Datosmundial.com,» Zimbabwe, 2022. [En línea]. Available: <https://www.datosmundial.com/africa/zimbabwe/index.php>. [Último acceso: 30 abril 2022].
- [RAMO20] A. O. Ramos, «República de Zimbabwe. Ficha técnica,» Centro de estudios internacionales Gilberto Bosque. Diplomacía parlamentaria, 2020.
- [10] «Mejor época para viajar a Zimbabwe,» Exotica, [En línea]. Available: <https://www.exoticca.com/es/blog/cuando-viajar-zimbabwe/>. [Último acceso: 30 abril 2022].
- [LORE05] Y. Lorenzo Acosta y M. C. Obaya Abreu, «La digestión anaeróbica. Aspectos teóricos. Parte I,» de *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar.*, La Habana, Cuba, Instituto Cubano de la Investigación de la Caña de Azúcar, 2005, pp. 35-48.
- [TWB19] T. W. B. Group, Lessons learned from on-farm biodigester programs in Africa, Wahington DC: ESMAP, 2019.
- [HERR08] J. M. Herrero, Biodigestores Familiare. Guía de diseño y manual de instalación, La Paz, Bolivia: GTZ-Energía, 2008.
- [14] «Weather Spark,» El clima y el tiempo promedio en todo el año en Mount Darwin., 2022. [En línea]. Available: <https://es.weatherspark.com/y/96834/Clima-promedio-en-Mount-Darwin-Zimbabwe-durante-todo-el-a%C3%B1o>. [Último acceso: 14 junio 2022].
- [CHAC07] J. A. G. Chacón, Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas, Ciudad de la Habana, Cuba: Cubasolar, 2007.

- [BAVE06] G. A. Bavera y C. H. Peñafort, «Lectura de la bosta del bovino y su relación con la alimentación,» de *Cursos de Producción Bovina de Carne*, 2006.
- [MENO11] C. d. A. S. Menonita, *Manual Técnico: La experiencia de Construcción y uso de biodigestores para producción energética en Copan y Lempira*, San Pedro, Honduras: Diseños e Impresiones Múltiples, 2011.
- [GUAR17] Y. Guardia-Puebla, Y. Rodríguez-Ponce y O. Benítez-Quintero, «Diseño de un biodigestor anaerobio para el tratamiento de los residuales sólidos del procesamiento cárnico,» *Granmense de Desarrollo local*, vol. 1, nº 2, pp. 1-14, 2017.
- [SANT20] J. Santos Freire, «Implantación de un sistema de saneamiento optimizado mediante un biodigestor en una aldea de Zimbabwe,» Universidad Pontificia de Comillas. ICAI, Madrid, 2020.
- [ACUÑ08] P. A. Acuña González, L. Sofía-ángel García, E. Borray Montoya, C. Corrales, Lucia y L. Consuelo Sánchez, «Aislamiento e identificación de microorganismos del género *Methanococcus* y *Methanobacterium* de cuatro fuentes de Bogotá D.C.,» Cundinamarca, 2008.
- [21] «PrecioGas,» 30 junio 2022. [En línea]. Available: <https://preciogas.com/faq/precio-kwh>. [Último acceso: 10 julio 2022].
- [22] «Organización Mundial de la Salud,» 21 marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sanitation>. [Último acceso: 5 julio 2022].
- [GUGG19] D. Guggenheim, Director, *Inside Bill's Brain: Decoding Bill Gates*. [Film]. 2019.

