



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TÉCNICAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Implantación de un sistema de saneamiento
optimizado mediante un biodigestor en una aldea de
Zimbabwe.

Autor: Jacobo Santos Freire
Director: Miren Telleria Ajuriaguerra

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Implantación de un sistema de saneamiento optimizado mediante un biodigestor en una
aldea de Zimbabwe

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

curso académico 2019/20 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.: Jacobo Santos Freire

Fecha: 18/ 08/ 2020

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Miren Telleria Ajuriaguerra

Fecha: 19/08/2020





GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TÉCNICAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE
SANEAMIENTO OPTIMIZADO MEDIANTE UN
BIODIGESTOR EN UNA ALDEA DE ZIMBABUE.

Autor: Jacobo Santos Freire

Director: Miren Telleria Ajuriaguerra

Madrid

IMPLANTACION DE UN SISTEMA DE SANEAMIENTO OPTIMIZADO MEDIANTE UN BIODIGESTOR EN UNA ALDEA DE ZIMBABUE.

Autor: Santos Freire, Jacobo.

Director: Telleria Ajuriaguerra, Miren.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Se trata de un proyecto al desarrollo en el que se analizan las distintas tecnologías en relación a biodigestores y se justifica cuáles son las más adecuadas para implantar en una zona subdesarrollada. Además, se propone un diseño para una aldea de Zimbabwe.

1. Introducción

Proyecto Zimbabwe es una iniciativa solidaria que nace con la idea de facilitar infraestructuras y dar las herramientas necesarias para favorecer el desarrollo de comunidades rurales e incommunicadas que no reciben ningún tipo de favor gubernamental.

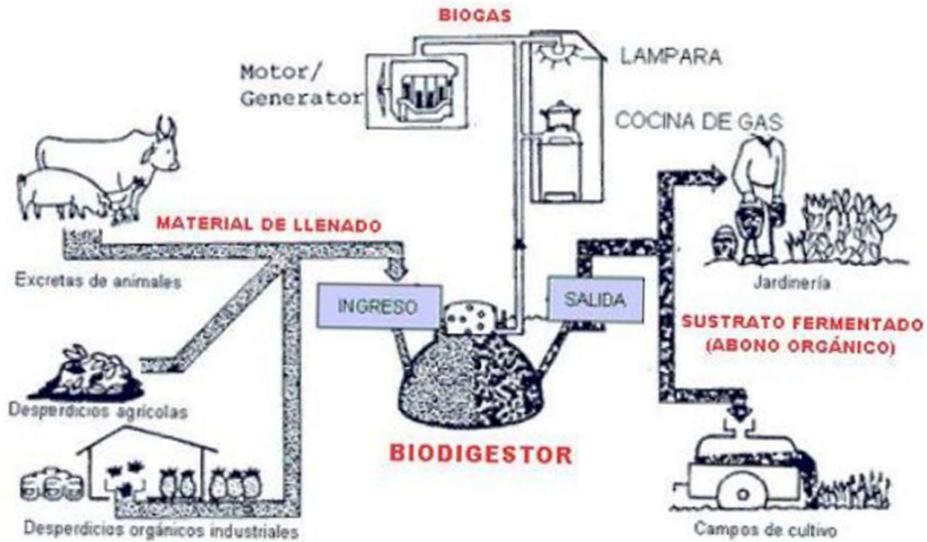
En Proyecto Zimbabwe participan una serie de alumnos de 4º curso de ICAI. Cada uno desarrolla su proyecto de fin de grado en relación a uno de los problemas de una comunidad subdesarrollada. Una vez finalizado el trabajo, se ejecuta en dicha comunidad por los mismos alumnos, que deben además buscar financiación por su propia cuenta. Dicha comunidad es el distrito de Mount Darwin, una aldea de Zimbabwe.

2. Definición del Proyecto

Este proyecto en concreto, se centrará en el desarrollo de un sistema de saneamiento mediante un biodigestor, que busca aportar una fuente de energía limpia al mismo tiempo que busca una solución a la falta de saneamiento de la localidad.

Los biodigestores, conocidos también como plantas (productoras o de producción) de biogás, son recintos o tanques cerrados donde materia orgánica y el agua residual permanecen un periodo de tiempo para lograr su descomposición produciendo biogás y bioabono.

A continuación un pequeño esquema del proceso. Por un lado del biodigestor se ingresa la materia orgánica y por otra se saca el abono orgánico. Por un tubo situado en la parte superior se saca el biogás, que se puede utilizar para una cocina o un generador.

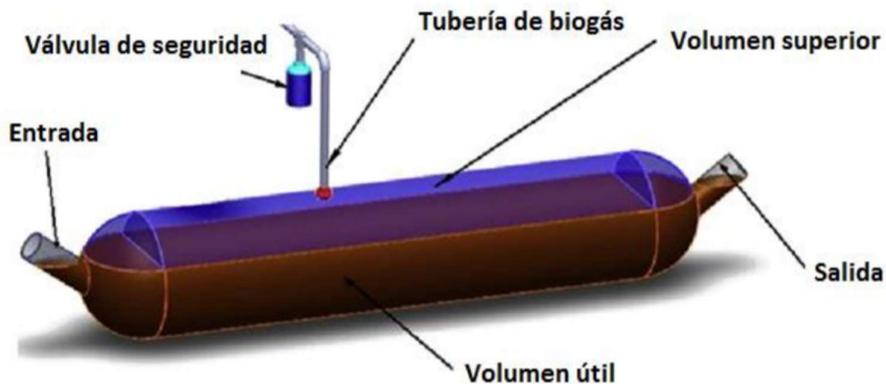


Existen diferentes tipos de biodigestores clasificados en función del flujo de carga introducida en el biodigestor: biodigestores de flujo discontinuo, de flujo semicontinuo y de flujo continuo. El trabajo se centrará únicamente en los de flujo semicontinuo, que son aquellos en los que la carga de material y descarga de efluente se realiza en intervalos, es decir, 1 o 2 veces al día, todos los días.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Dentro de los biodigestores de tipo semicontinuo existen tres tipos: los de cúpula fija o tipo Chino, los de cúpula móvil o tipo Hindú y los tubulares o tipo Taiwán.

El modelo taiwanés comparado con otros digestores es el de menor costo, mayor facilidad de instalación, manejo, mantenimiento y reparación, y posee la más alta eficiencia. Teniendo en cuenta la situación en la que se va a construir el biodigestor, la mano de obra que en el futuro podrá repararlo y el presupuesto para construir tanto este como otros en el futuro; el de tipo taiwanés resulta el más adecuado.



Consiste en un fermentador y cámara de almacenamiento de biogás en forma tubular hecha de polietileno, el cual es instalado en forma horizontal en una zanja excavada en el suelo que funciona como aislante térmico, con un tubo de admisión del afluente y un tubo de salida del efluente, y un tubo en la parte superior central para la salida del biogás. Los residuos entran por un lado y salen por el otro a la misma cantidad del material digerido.

4. Resultados

En el trabajo se realiza un diseño con el ingreso de estiércol humano estimado para una localidad de Zimbabue.

Debido a la relación de carbono:nitrógeno presente en los estiércoles humanos, se hace necesario mezclarlos con estiércoles bovinos. Y debido a la cantidad de sólidos totales, se finaliza la mezcla con agua. Una vez obtenida la materia orgánica que se va a ingresar en el sistema, se obtienen las dimensiones del mismo, y la cantidad de gas generado, con la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen de gas (m}^3\text{)} = \text{Kg estiércol bovino} * 0.04 + \text{Kg excreta humana} * 0.06$$

Con la cantidad de 44 Kg de estiércol humano y 43 Kg de estiércol bovino, se obtienen 4.36 m³ biogás/día.

5. Conclusiones

La producción de biogás será considerable y suficiente para cocinar y calentar agua durante unas horas, pero en un principio no se espera que haya cantidades de sobra.

Además, en la situación de una zona rural y pobre como Mount Darwin, la ausencia de un sistema de saneamiento significa que los residuos van a parar a zonas donde no deberían, como ríos o lagos, lo que supone la contaminación de estos, y la consecuente intoxicación de quienes los utilizan.

El biodigestor no solo supondrá una generación de energía limpia y barata si no que servirá como un sistema de saneamiento que de momento es totalmente inexistente.

6. Referencias

- [1] Biodigestor: qué es y cómo hacer uno casero | Fundación Aquae. (2020). Retrieved 14 August 2020, from <https://www.fundacionaquae.org/biodigestor/>

- [2] Martí Herrero J. 2019. Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación. Redbiolac. Ecuador. ISBN: 978-9942-36-276-6
- [3] Varnero Moreno, M. (2011). *Manual de Biogás*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

IMPLEMENTATION OF AN OPTIMIZED SANITATION SYSTEM BY A BIODIGESTER IN A ZIMBABWEAN VILLAGE.

Author: Santos Freire, Jacobo.

Supervisor: Telleria Ajuriaguerra, Miren.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

It is a development project in which different technologies in relation to biodigesters are analyzed, and it justifies which of them are more adequate for its implementation in a undeveloped site. Moreover, it suggests a design for a Zimbabwean village.

1. Introduction

Project Zimbabwe is a solidary initiative that pretends to facilitate infrastructure and give the necessary tools to support the development of uncommunicated rural communities with no governmental favors.

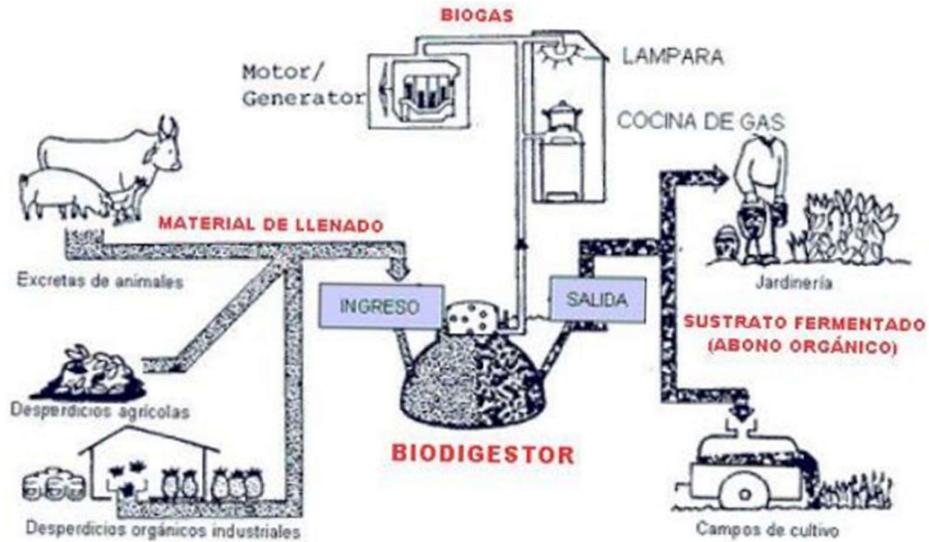
A group of students from ICAI are involved in Project Zimbabwe. Each of them develop its end of degree project in relation to one of the many problems of an undeveloped community. Once the works are done, they are implemented by the same students, who need to look for funding on its own. Said community is Mount Darwin district, a village in Zimbabwe.

2. Project definition

This Project in particular, will focus in the development of a biodigester, which aims to provide clean and cheap energy at the same time it gives a solution to a non-existent sanitation system.

Biodigesters, also known as biogas production plants, are closed tanks where organic matter and residual waters remain a period of time to achieve its decomposition producing biogas and fertilizer.

The next image shows a scheme of the process. Through one side, the organic matter enters the tank, and though the other the organic matter leaves de system. Through a tube situated in the upper part, biogas leaves de system right to a generator or kitchen.

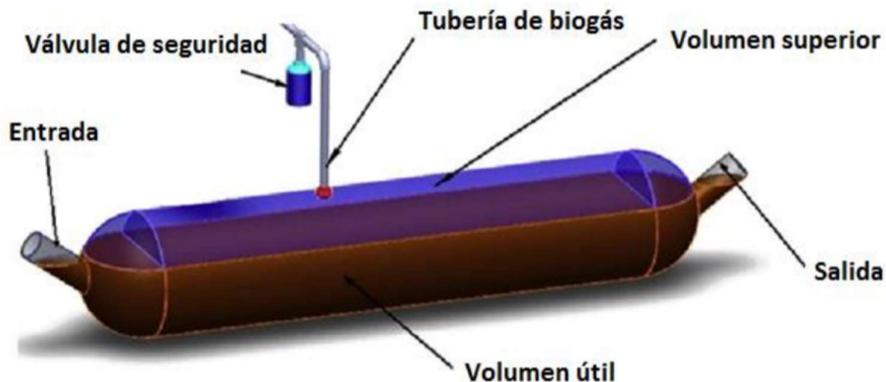


There are different types of biodigesters classified depending on the flow of the loads that enter the biodigester: Discontinuous flow, semi-continuous flow and continuous flow. This work will focus on the semi-continuous flow biodigesters, which are those in which the matter loads and the effluent discharge occur in intervals, everyday, every 12 or 24 hours.

3. Description of the system.

There are 3 types of semi-continuous flow biodigesters: Chinese type, Hindu type and Taiwanese type.

Taiwanese model, compared to the other digesters, is the cheapest, the one with easiest installation, management, maintenance and reparation, and with highest efficiency. Known the situation in which the biodigester will be built, the available labour for maintenance and budget, Taiwanese type is the most appropriate.



It consists on a reactor (which also functions as a biogas storing chamber) with tubular form, made of polyethylene, installed in a trench that works as thermal insulating, and with 3 tubes: one for the entering matter, another one for the effluent, and the last for biogas

4. Results

The Project suggests a design based on a daily entering matter of 44 Kg of human feces for a Zimbabwean village.

Due to the existing Carbon:Nitrogen relation in human feces, its necessary so mix them with bovine manure. And due to the total solids, water must be added to the mix. Once known the daily entering matter, the system is designed, and the obtained gas can be calculated as:

$$\text{Gas volume (m}^3\text{)} = \text{Kg bovine manure} * 0.04 + \text{Kg human feces} * 0.06$$

With the quantity of 44 Kg of human feces and 43 Kg of bovine manure, 4.36 m³ biogas/day is obtained.

5. Conclusions

Biogas production Will be considerable and sufficient to cook and heat water for a few hours, but there will be no excess biogas expected.

Also, in a rural and poor place such as Mount Darwin, the absence of a sanitation system means waste ends up in rivers and lakes, which results in the contamination of this sites, resulting in an increase in the contraction of intoxication related illnesses.

The biodigester not only means a generation of clean and cheap energy but also works as a sanitation system which at the present moment is totally non-existent.

6. References

- [1] Biodigester: qué es y cómo hacer uno casero | Fundación Aquae. (2020). Retrieved 14 August 2020, from <https://www.fundacionaquae.org/biodigester/>
- [2] Martí Herrero J. 2019. Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación. Redbiolac. Ecuador. ISBN: 978-9942-36-276-6
- [3] Varnero Moreno, M. (2011). *Manual de Biogás*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Proyecto Zimbabue.....	7
1.2 Motivación	11
1.3 Objetivos del proyecto.....	12
1.4 Alineación con los ODS	14
Capítulo 2. Biodigestores.....	16
2.1 ¿Qué son?	16
2.2 ¿Cómo funciona?.....	18
2.3 Procesos de biodigestión	19
2.3.1 Digestión Aeróbica.....	20
2.3.2 Digestión anaeróbica	21
2.4 Biogás.....	23
2.4.1 Usos del biogás.....	24
2.4.2 Tratamiento del biogás para la obtención de energía térmica	25
2.5 Bioabono	28
2.5.1 Bioabono como acondicionador y fertilizante.....	29
2.6 Tipos de biodigestores.....	29
2.6.1 Biodigestores de flujo continuo	30
2.6.2 Biodigestores de flujo discontinuo	31
2.6.3 Biodigestores de flujo semi-continuo	31
2.7 Experiencias con biodigestores en zonas rurales.....	37
2.7.1 Biogas for Better Life, an African Initiative	38
2.7.2 Biogás en China	38
2.7.3 Democratización de los biodigestores en Latinoamérica	39
Capítulo 3. Diseño e instalación de biodigestores tubulares	40
3.1 Parámetros a controlar.....	40
3.1.1 Relación carbono/nitrógeno de la materia orgánica	40
3.1.2 Cantidad de sólidos totales	42
3.1.3 Temperatura y tiempo de retención hidráulico (trh).....	44
3.1.4 pH.....	46

3.2	Dimensionamiento del biodigestor.....	47
3.2.1	Volumen del biodigestor.....	47
3.2.2	Dimensiones del biodigestor.....	48
3.3	Volumen de biogás.....	48
3.4	Instalación del biodigestor.....	50
3.4.1	Ubicación.....	50
3.4.2	Cavado de la zanja.....	51
3.4.3	Montaje del biodigestor.....	53
3.4.4	Tuberías de alimentación y efluente.....	54
3.5	Conducción de gas.....	55
3.6	Plan de ejecución.....	56
3.6.1	Obtención de materiales.....	56
3.6.2	Cavado de la zanja.....	57
3.6.3	Instalado del biodigestor.....	57
3.6.4	Instalado de las tuberías.....	58
3.6.5	Instalado de la conducción de gas.....	58
Capítulo 4. Funcionamiento y mantenimiento.....		59
4.1	Puesta en marcha.....	59
4.1.1	Inflado.....	59
4.1.2	Llenado de agua.....	59
4.1.3	Llenado de estiércol.....	60
4.2	Carga diaria.....	60
4.3	Primer gas útil.....	60
4.4	Mantenimiento.....	61
4.5	Reparaciones.....	62
Capítulo 5. Cálculos y resultados.....		64
5.1	Carga diaria.....	64
5.1.1	Relación C/N.....	64
5.1.2	Cantidad de sólidos totales.....	65
5.2	Dimensionamiento del biodigestor.....	65
5.2.1	Tiempo de retención hidráulico (trh).....	65
5.2.2	Volumen del biodigestor.....	66

5.2.3 Dimensiones del biodigestor	66
5.3 Gas producido.....	67
5.4 Dimensionado de la zanja.....	67
5.4.1 Cálculo de la lona del biodigestor	68
5.5 Resultados	68
Capítulo 6. Plan económico	70
6.1 Presupuesto de coste.....	70
6.2 Plan de viabilidad	75
Capítulo 7. Conclusiones.....	77
Capítulo 8. Bibliografía.....	78

Índice de figuras

Figura 1: Billeto de 100 trillones de dólares, fruto de la hiperinflación [3]	9
Figura 2: Imágen satélite de Zimbabue, resaltando Mount Darwin	10
Figura 3: ODS principales del proyecto	13
Figura 4: ODS establecidos por la ONU	14
Figura 5: Esquema general de un biodigestor [4].....	17
Figura 6: Esquema sobre los procesos de digestión y sus productos [13].....	23
Figura 7: Esquema de los diferentes tratamientos según el uso del biogás [9]	26
Figura 8: Recipiente para una trampa de agua	27
Figura 9: Filtro de ácido sulfhídrico (H ₂ S) [diseño].....	28
Figura 10: Esquema sobre diferentes tipos de biodigestores.....	30
Figura 11: Etapas en un biodigestor de flujo discontinuo (tipo batch) [9]	31
Figura 12: Esquema de un biodigestor de cúpula fija [17].....	32
Figura 13: Esquema de un biodigestor de cúpula móvil [Manual de diseño y de difusión de biodigestores familiares, con enfoque en biodigestores tubulares]	34
Figura 14: Esquema de un biodigestor de tipo tubular [Manual de diseño y de difusión de biodigestores familiares, con enfoque en biodigestores tubulares]	35
Figura 15: Esquema de una válvula de seguridad [18].....	36
Figura 16: Ejemplos reales de biodigestores tubulares [19].....	37
Figura 17: Gráfico para el cálculo del factor de corrección [27].....	45
Figura 18: Composición del biogás en función del pH de las mezclas de guano-tuna [28]	46
Figura 19: Dimensiones y parámetros de una zanja	51
Figura 20: Forma de una zanja vista lateralmente.	52
Figura 21: Cotas de la vista lateral de una zanja	53

Índice de tablas

Tabla 1: Biogás producido en función de los sólidos volátiles [8].....	19
Tabla 2: Valor calorífico de distintos gases [9].....	24
Tabla 3: Comparativa de las relaciones C/N en distintos estiércoles [24]	41
Tabla 4: Comparativa de las cantidades en % de C y N en distintos estiércoles [24].....	41
Tabla 5: % de sólidos totales en distintos residuos [25, 8].....	43
Tabla 6: Microorganismos presentes en la fermentación anaerobia en función de la temperatura [26]	44
Tabla 7: Volumen de biogás por Kg de estiércol bovino y humano [24].....	49
Tabla 8: Consumo de biogás en m ³ /h en distintos utensilios [6].....	49
Tabla 9: Valores para dimensionado óptimo de una zanja [29]	52
Tabla 10: Lista de materiales con costes unitarios	71

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Cálculo de la relación entre C y N al mezclar estiércoles	42
Ecuación 2: Cálculo de la cantidad de agua necesaria para un % de sólidos totales.....	43
Ecuación 3: Cálculo del tiempo de retención según el factor de corrección.....	45
Ecuación 4: Cálculo del volumen del biodigestor	47
Ecuación 5: Cálculo del volumen de materia orgánica	47
Ecuación 6: Cálculo del volumen de biogás.....	47
Ecuación 7: Cálculo del volumen de carga diaria	47
Ecuación 8: Relación óptima entre la longitud y el diámetro del biodigestor.....	48
Ecuación 9: Cálculo del radio-longitud del biodigestor conocidos el volumen del biodigestor y la ecuación 8	48
Ecuación 10: Cálculo del volumen de biogás generado diariamente	49
Ecuación 11: Cálculo de la longitud de la lona	53

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se introducen distintas problemáticas existentes en Zimbabwe y sus causas, basándose en un contexto histórico. Además, se explica en qué consiste Proyecto Zimbabwe y como pretende dar solución a estos problemas. Por último, se explican los problemas concretos a los que dará solución este proyecto en concreto, y la motivación que me lleva a escoger este TFG entre tantos posibles.

1.1 PROYECTO ZIMBABUE

PROJECT
ZIMB△BWE



Proyecto Zimbabwe es una iniciativa solidaria que nace con la idea de facilitar infraestructuras y dar las herramientas necesarias para favorecer el desarrollo de comunidades rurales e incommunicadas que no reciben ningún tipo de favor gubernamental. De esta forma ellos podrán crecer de manera independiente, algo que es vital debido a la falta de ayudas.

En Proyecto Zimbabwe participan una serie de alumnos de 4º curso de ICAI. Cada uno desarrolla su proyecto de fin de grado en relación a uno de los problemas de una comunidad subdesarrollada. Una vez finalizado el trabajo, se ejecuta en dicha comunidad por los mismos alumnos, que deben además buscar financiación por su propia cuenta. Debido a la situación actual esto no será posible cuando se tenía programado (verano de 2020) y se pospondrá a otra fecha en caso de que sea posible.

Este es un proyecto de ingeniería al desarrollo, no únicamente de ingeniería. Los proyectos de ingeniería industrial son aquellos que reúnen todos los recursos necesarios para transformar una idea en una realidad de tipo industrial, es decir, de aplicación en un contexto industrial. Esos recursos pueden ser escritos, cálculos, dibujos, entre otros. Por otro lado, un proyecto de ingeniería industrial al desarrollo reúne la misma información que uno de ingeniería normal pero dicha información está orientada a mejorar las condiciones de vida en una determinada región o país en forma integral y sostenible.

Para comenzar a entender el propósito y necesidad de este proyecto se hace necesario conocer el contexto social, político y económico del país en este momento. Y para entender la situación actual, es necesario remontarse un par de siglos atrás, a la colonización de Zimbabue.

Zimbabue fue colonizado por Inglaterra en el siglo XVIII. Durante años fue gobernada por la Compañía Británica de Sudáfrica, hasta ser transferida en 1923 al gobierno de Gran Bretaña. Durante las primeras décadas, la Compañía Británica entregó grandes extensiones de tierra a los colonos ingleses, lo que sería el inicio de unos conflictos presentes todavía a día de hoy [1].

Hasta 1980 hay dos guerras ambas causadas por la colonización y la injusticia en el reparto de tierras. En 1980 llega el primer presidente negro, Robert Mugabe, que gobernará nada menos que hasta 2017. En este tiempo se hacen amagos de reformas agrarias que no llegan a nada, la economía se ahoga y el país sufre el mayor hiperinflación de su historia (79.600.000.000% a finales de 2008) [2]. El éxodo de zimbabuenses inundó la vecina Sudáfrica y la oposición le plantó cara a Mugabe en las urnas. La respuesta del Gobierno fue una brutal oleada de torturas y represión, incluyendo a líderes visibles como Morgan Tsvangirai.



Figura 1: Billeto de 100 trillones de dólares, fruto de la hiperinflación [3]

El 14 de noviembre de 2017, se produjo un golpe de Estado ejecutado por las fuerzas armadas, y Emmerson Mnangagwa (exvicepresidente destituido el 4 de noviembre) asume como presidente el 24 de noviembre de 2017, convirtiéndose en el tercer presidente del país, que sigue actualmente en el cargo.

Conocida la historia del país, se comprende la situación actual de pobreza. Además de su historia, se suman otros factores que contribuyen a que Zimbabue sea un país muy pobre. Algunos de ellos son las regulares catástrofes naturales (sequías e inundaciones) o la pandemia del VIH, que llega a alcanzar al 12,70 % de la población entre 15 y 49 años, siendo el 5º país del mundo en número de afectados.

También influye el alto riesgo de contraer un amplio número de enfermedades infecciosas mayores. Esto se debe a distintas causas como puede ser que un 23% de la población siga sin tener acceso a agua debidamente tratada, que un 60% de la población no tenga acceso a instalaciones de saneamiento mejoradas o el alto porcentaje de desnutrición infantil (alrededor del 8,5% en menores de 5 años).

La población que peor parte se lleva es aquella que vive en zonas rurales, ya que son las que menos ayudas reciben, y en muchos casos no tienen acceso a sanidad, sistemas de

saneamiento apropiados o a agua debidamente tratada. En especial los niños, que son siempre la población más vulnerable, y que en Zimbabwe representa un 40% de la población total.

Mount Darwin, la localidad elegida, es una ciudad remota de Zimbabwe, de difícil acceso y una de las más afectadas por la pobreza. Los proyectos se fijan especialmente alrededor de los grupos más vulnerables, como niños y enfermos de VIH. En Mount Darwin se sitúan dos colegios, uno de primaria y otro de secundaria, por ello los trabajos tienen un impacto directo en alrededor de 1600 niños.

La siguiente imagen sirve como referencia para situar la localidad en el mapa. Como se ve, la ciudad más cercana es Harare, a 130 km. Teniendo en cuenta las precarias vías de comunicación entre ambas localidades se puede decir que Mount Darwin está aislado.



Figura 2: Imágen satélite de Zimbabwe, resaltando Mount Darwin

Los problemas son muy numerosos, se han escogido algunos de los más importantes y se les ha buscado alguna solución. Los proyectos propuestos como soluciones a algunos de los

problemas presentes en la localidad y que buscan el desarrollo del distrito de Mount Darwin son los siguientes:

- Definición de sistema de riego para optimizar el consumo y maximizar productividad
- Construcción de zona común abierta para formaciones cortas mediante Workshops
- Reparación de las carreteras de acceso a la escuela
- Construcción de un nuevo bloque para impartir más clases y proporcionar soporte administrativo
- Reparación de la presa construida localmente
- Instalación de turbina para aprovechamiento de presa local
- Construcción de una piscifactoría para incrementar ingresos
- Construcción de instalaciones sencillas para animales (cerdos, gallinas, vacas, etc)
- Instalación solar para bloques de aulas pero con instalación de transformador eléctrico para reducir costes y garantizar red a todos los sistemas necesarios (ejemplo, equipos de riego, formaciones tipo soldadura, etc.)
- Construcción de edificio para albergar varias consultas de asistencia básica, especialmente para mujeres embarazadas y asistencia para enfermedades que requieran de testeo, como el VIH.

Este proyecto en concreto, se centrará en el desarrollo de un sistema de saneamiento mediante un biodigestor, que busca aportar una fuente de energía limpia al mismo tiempo que busca una solución a la falta de saneamiento de la localidad.

1.2 MOTIVACIÓN

Como ya se ha mencionado anteriormente, este es un proyecto solidario. La principal atracción que tenía este proyecto no era otra que al mismo tiempo que realizase el trabajo de fin de grado, estaría desarrollando las bases para una infraestructura que iba a tener un impacto muy grande en la vida de los habitantes de una ciudad sin recursos. Por lo tanto es

un proyecto sin importancia, si no que tendrá una repercusión importante para ciertas personas.

Personalmente, soy consciente de mis privilegios y de la suerte que he tenido de estudiar una ingeniería en una escuela como el ICAI, y de alguna forma con este proyecto aprovecho todo ello para ayudar a otras personas que no han tenido la misma suerte. Se busca otorgar algunas de las herramientas necesarias a un pueblo que es pobre y que no tiene ayudas, para que pueda ser autosuficiente y valerse por sí mismo.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El principal objetivo del proyecto es desarrollar las infraestructuras y dar herramientas a las comunidades para que puedan desarrollarse en entornos de seguridad. Mediante Proyecto Zimbabwe, favorecemos el desarrollo de una de las zonas más pobres del sur de África mediante proyectos de infraestructuras que generen un impacto en las comunidades locales. De esta manera ellos mismos podrán crecer de manera sostenible e independiente.

Cada trabajo desarrollado tiene distintas repercusiones en el poblado, en concreto el desarrollo de un sistema de saneamiento mediante un biodigestor tiene muchos beneficios.

En la situación de una zona rural y pobre como Mount Darwin, la ausencia de este sistema de saneamiento significa que los residuos van a parar a zonas donde no deberían, como ríos o lagos, lo que supone la contaminación de estos. Por lo tanto, la ausencia de un sistema de saneamiento apropiado resulta en contaminación de suelos, contaminación de aguas (subterráneas y superficiales), contaminación de recursos... Algo que resulta crítico en una comunidad rural, ya que la mayor parte de la población vive de la tierra.

Por otra parte, se busca el retorno de los nutrientes contenidos en nuestras excretas (como el fósforo, nitrógeno o potasio) al suelo y su posterior uso en la producción agrícola. Esto se realiza mediante un biodigestor, en el que se tratan los residuos, hasta que se obtiene un abono orgánico que es óptimo a la hora de cultivar. Como se ha mencionado, es un distrito

rural, que vive principalmente de la tierra, por lo que esto les supondría una ayuda muy importante.

Finalmente, busca producir un gas con alto contenido en metano (denominado biogás), que resulta ser una fuente de energía limpia y económica. Es una energía al igual que el gas natural, que se obtiene del mismo biodigestor.

Dentro del proyecto se busca especialmente cumplir con una serie de objetivos planteados por las Naciones Unidas. Dichos objetivos buscan poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para 2030. Con los objetivos explicados anteriormente se ve de forma clara que los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) que más se persiguen son los siguientes:



Figura 3: ODS principales del proyecto

El primero, fin de la pobreza. El objetivo más directo del proyecto es proporcionar a la comunidad infraestructuras y ayudas que contribuyan a su propia autosuficiencia. Ayudando a una comunidad a ser autosuficiente y a desarrollarse, se impulsa el fin de la pobreza.

Segundo, agua limpia y saneamiento. El proyecto se centra precisamente en el saneamiento de las aguas residuales. Es un problema muy importante, como ya se ha explicado.

Por último, energía asequible y no contaminante. El biogás es una fuente de energía limpia y no tiene ningún coste más allá del coste de la instalación.

1.4 ALINEACIÓN CON LOS ODS

Al ser un proyecto solidario que impulsa el desarrollo, éste cumple con muchos Objetivos de Desarrollo Sostenible además de los ya mencionados, aunque sea de una forma menos directa:



Figura 4: ODS establecidos por la ONU

Hambre cero. Por una parte, la generación de ese abono orgánico del biodigestor ayuda a unas cosechas más propicias, generando más alimento. Por otra, el mismo biogás del biodigestor es utilizado directamente para cocinar (cocinas de gas).

Salud y bienestar. Tener un suelo y unas aguas no contaminados es vital para una vida sana.

Educación de calidad. Los trabajos tienen impacto en alrededor de 1600 niños, ya que se realizan alrededor de dos colegios, uno de primaria y otro de secundaria. Se pretende aportar recursos a dichos colegios.

Igualdad de género. El trabajo en si no se alinea directamente con este objetivo. Sin embargo, el proyecto no es solo el trabajo del biodigestor, si no ir a Zimbabue y construirlo. Una vez allí, se puede pedir que la mano de obra que nos ayude a montar el proyecto sea mixta. Además, enseñar a personas de ambos géneros cómo construir biodigestores ellos mismos y hacerles ver que todos pueden hacer el trabajo.

Trabajo decente y crecimiento económico. El objetivo de todos los proyectos es el desarrollo de la comunidad que resultaría, entre otras cosas, en crecimiento económico.

Industria, innovación e infraestructura. Aunque para nosotros un biodigestor no sea nada innovador, se está promoviendo el construir infraestructuras que para ellos si son útiles e incluso innovadoras.

Reducción de las desigualdades. Se está impulsando el desarrollo de una comunidad sin ayudas intentando reducir las desventajas que tiene respecto a otras.

Comunidades sostenibles. Tanto el biogás como el abono orgánico contribuyen a una comunidad sostenible.

Acción por el clima. Con el sistema de saneamiento, se reduce el desecho de residuos al medioambiente, reduciendo la contaminación de aguas, de recursos y del medioambiente en conjunto.

Vida submarina. Como se ha dicho en el anterior punto, se reduce la contaminación de aguas, contribuyendo a la vida submarina.

Vida de ecosistemas terrestres. Al igual que se contaminan aguas superficiales y subterránea, también se contamina la superficie, el suelo. Con el sistema de saneamiento se busca entre otras cosas reducir esta contaminación.

Por lo tanto, dentro de los 17 ODS que existen, este proyecto contribuiría de una forma más o menos directa a al menos 14 de los objetivos. Los 3 restantes, son proyectos a los que un trabajo de este tipo no pueden contribuir: Paz, justicia e instituciones sólidas, alianzas para lograr objetivos y consumo responsable.

Capítulo 2. BIODIGESTORES

En este capítulo se introducen los biodigestores, su funcionamiento, las reacciones que ocurren en él, los productos y los distintos tipos existentes. Finalmente en función a todas estas explicaciones se escoge un tipo de biodigestor.

2.1 ¿QUÉ SON?

Un biodigestor en su forma más elemental es un contenedor cerrado de forma hermética e impermeable, denominado reactor, que contiene materia orgánica procedente de: vegetales y carne en descomposición, y excrementos humanos o animales en una disolución con agua [5]. En el sistema, en ausencia de oxígeno y presencia de consorcios bacterianos adecuados, se desarrolla de forma natural la digestión anaerobia y se captura el biogás producido. Un biodigestor tiene un funcionamiento similar a un sistema digestivo animal [6]: entra materia orgánica que será digerida por bacterias, produciendo gases (biogás) y un sobrante líquido que es un excelente fertilizante.

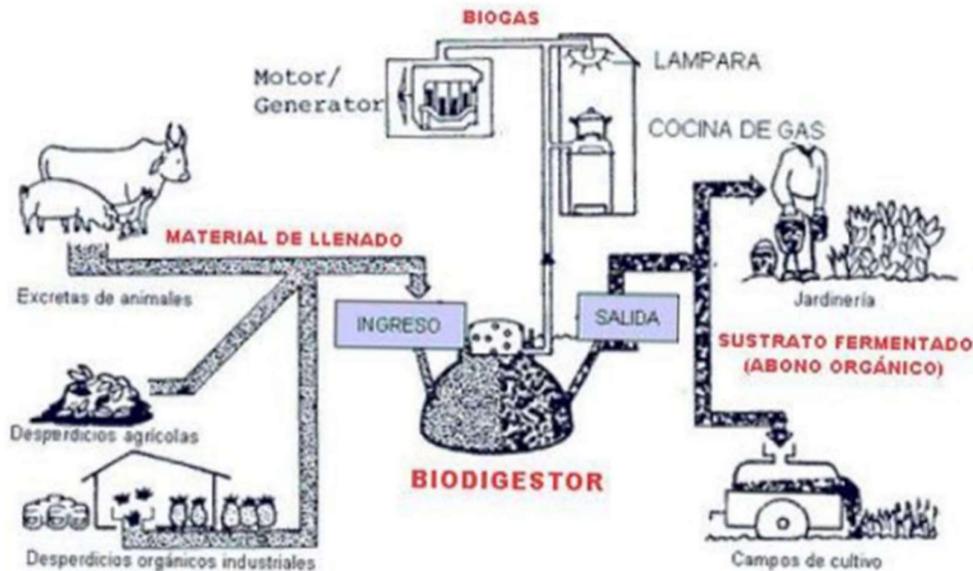


Figura 5: Esquema general de un biodigestor [4]

Esta imagen es una síntesis del funcionamiento del biodigestor: muestra por un lado la carga y por otro lado los distintos productos del proceso, el biogás y el abono orgánico.

Esta biodigestión tiene una serie de beneficios directos, entre los que destacan la generación de biogás, de bioabono y la disminución del potencial contaminante del estiércol animal y humano, disminuyendo enormemente su Demanda Química de Oxígeno (DQO) y su Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) [7]. Este servicio de tratamiento de residuos, sumado a la obtención de sus dos subproductos asociados (biogás y bioabono), son de gran importancia para la resiliencia de productores pequeños y medianos, reduciendo los gases de efecto invernadero (GEI) y sobre todo evitando la contaminación de cuerpos de agua.

El biogás es el nombre que recibe la mezcla de gases que se retiene en el reactor. Puede emplearse para cocinar en sustitución de otros combustibles como el gas propano, la leña y la electricidad. Esto se debe a su composición. Contiene entre un 50 y un 70% de metano(CH_4), un 20 - 40 % de dióxido de carbono (CO_2) y trazas de más gases, algunos de los cuales serán importantes debido a los problemas que traen consigo, como puede ser el

ácido sulfhídrico (H_2S) [6]. El más importante es el metano, que es el que le otorga un potencial importante como gas combustible.

El bioabono es un subproducto líquido que se utilizará como fertilizante debido a su rico nivel de nutrientes, como nitratos inorgánicos (NO_3), potasio (K) y fósforo (P). Además, no es necesario dejar que este bioabono se oxigene y libere los ácidos que pueda contener, como en otros abonos naturales. Se puede utilizar inmediatamente después de su obtención. Otros beneficios de este bioabono tienen que ver con su capacidad para ajustar el nivel de pH del suelo, la mejora del drenaje de suelos arcillosos y la disminución de la erosión. [5]

2.2 ¿CÓMO FUNCIONA?

El proceso de digestión anaerobia en el que se basa el funcionamiento de un biodigestor se desarrolla en una serie de etapas y por una gran cantidad de bacterias distintas. Estas etapas de digestión son como una cadena, los residuos generados por uno de los grupos de bacterias serán el alimento de otras bacterias y a su vez los residuos de las mismas serán el alimento de otro grupo de bacterias.

Los grupos bacterianos necesarios para que se lleve a cabo la digestión anaerobia están presentes en los estiércoles animales. De esta forma cualquier estiércol puede utilizarse como materia prima en un biodigestor sin necesidad de añadir nada más que no sea agua. No sucede lo mismo con otras materias orgánicas como pueden ser residuos de industrias o cosechas, que no poseen dichos grupos bacterianos. Sin embargo, si que es posible utilizarlos como materia prima principal. Aunque, para que funcione, se hace necesario añadir en un primer momento, cuando se arranca el biodigestor, una carga inicial que si contenga dichas bacterias. De esta manera, cualquier materia orgánica podría ser utilizada para obtener los subproductos esperados.

Sin embargo, no por tener estas bacterias van a tener un mayor potencial de producción. De hecho, los productos que no pasan por un estómago previamente son los que mayor potencial tienen, como pueden ser los residuos de industrias alimenticias o residuos de cosechas. A su

vez, los productos que pasan por un estómago (sistemas monogástricos) tendrán mayor potencial que los que pasan por varios (sistemas poligástricos) [6]. Por ello, en la siguiente tabla, atendiendo a la producción de biogás por kilogramo de materia, el potencial de producción de bovinaza es muy inferior al de porcínaza, gallinaza:

Tabla 1: Biogás producido en función de los sólidos volátiles [8]

<i>Residuos animales</i>	<i>m³ biogás/Kg de residuos</i>	<i>CH₄ (%)</i>
Bovinaza	0.3111	59.8
Gallinaza	0.0871	65.2
Porquinaza	0.3234	65.0

Se está hablando de un proceso que se da en la naturaleza y su eficiencia dependerá de dos parámetros: la temperatura y el tiempo. De forma que, a una temperatura mayor se requerirá menos tiempo de retención de la materia, y a menor temperatura se requerirá mayor tiempo de retención (se denomina tiempo de retención como el tiempo que pasa cada una de las cargas en el reactor). Esto se debe a que la materia se degrada más fácilmente a temperaturas altas. De esta forma, aumentaremos la producción de gas si somos capaces de calentar el reactor (ya sea naturalmente, si la ubicación es en uno de los trópicos u otras zonas cálidas o mediante un invernadero), aumentaremos la producción, aunque puede no ser rentable si esta calefacción es costosa.

2.3 PROCESOS DE BIODIGESTIÓN

El adecuado manejo de los residuos orgánicos implica un reciclaje de estas materias obteniendo productos con valor. El reciclaje de estas materias orgánicas ha recibido una gran importancia debido a la persistente búsqueda de energías no tradicionales, vías de descontaminación y sistemas de saneamiento. [9]

La transformación de los residuos dispone un amplio rango de respuestas a la molécula de oxígeno, componente fundamental en las células. Esto permite que existan bioprocesos que incluyen oxígeno, pero otros en los que está ausente, cada uno de ellos adecuado al tratamiento de distintos residuos. La digestión de residuos en presencia de oxígeno se denomina digestión aeróbica, y en ausencia del mismo, digestión anaeróbica.

2.3.1 DIGESTIÓN AERÓBICA

La digestión aeróbica consiste en los distintos procesos realizados por grupos de microorganismos como bacterias o protozoos, que en presencia de oxígeno actúan sobre la materia orgánica, transformándola.

Es un proceso en el que los lodos (la materia orgánica) es sometida a un proceso de aireación en un tanque descubierto, que implica una oxidación directa de la materia biodegradable y autooxidación de la materia celular.

En un principio, los microorganismos se ponen en contacto con una fuente ilimitada de carga y se reproducen de forma logarítmica y siendo el único límite su propia habilidad para reproducirse. La tasa de consumo de oxígeno aumenta rápidamente debido a la absorción.

Poco a poco se establece la oxidación, y el crecimiento bacteriano disminuye. Ahora el limitante son las fuentes de carbono orgánico y, por consiguiente, se establece una disminución en el consumo de oxígeno. Cuando la cantidad de materia orgánica comienza a ser insuficiente, los propios microorganismos comienzan a autooxidarse mediante su metabolismo. [9]

Este proceso presenta ventajas como un bajo capital de inversión, inexistencia de olores desagradables, reducción de coliformes fecales y consecuentemente de organismos patógenos o un producto con una baja demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

Sin embargo, también presenta importantes desventajas, como: altos consumos de energía, falta de parámetros y criterios de diseño o la dificultad que presentan los lodos una vez se digieren para ser separados.

2.3.2 DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaeróbica, también llamada biometanización, es un proceso microbiológico en el que la materia orgánica se degrada en ausencia de oxígeno. Este proceso lo llevan a cabo bacterias anaerobias, muy similares a aquellas que se encuentran en los tractos digestivos de los humanos y animales, bajo unas condiciones específicas: en ausencia de oxígeno (las bacterias anaerobias solo sobreviven en ausencia del mismo) y a una temperatura determinada. Dichas condiciones se consiguen precisamente en los biodigestores. Esto no quiere decir que la digestión anaerobia no suceda en un entorno natural, que es de hecho muy común en pantanos, marismas o profundidades de océanos.

Con este proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos como estiércoles animales, humanos, residuos de industrias, en subproductos útiles. En este proceso, un 90% de la energía disponible por oxidación directa es convertida en metano, mientras que en un proceso aeróbico, solamente el crecimiento bacteriano representa el 50% de consumo de energía disponible.

2.3.2.1 Etapas de la digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso complejo por tres motivos: la diversidad de microorganismos presentes en el proceso, la cantidad de reacciones distintas que suceden al mismo tiempo y por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar.

El proceso anaeróbico conlleva 4 etapas:

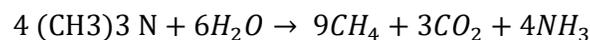
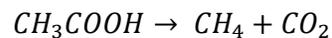
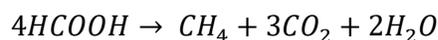
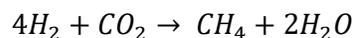
1. **Hidrólisis:** En esta etapa se lleva a cabo la hidrólisis de partículas y moléculas complejas como proteínas, carbohidratos y lípidos. Esta etapa es necesaria ya que la materia orgánica no puede ser utilizada por los microorganismos hasta que estos no hidrolizan compuestos solubles que puedan atravesar la pared celular. [10]
2. **Acidogénesis:** En esta etapa, las moléculas orgánicas solubles son fermentadas a alcoholes, hidrógeno, CO₂ y ácidos grasos volátiles (acético, propiónico, butírico), que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. Este grupo de bacterias no solo produce el alimento del posterior conjunto

de bacterias si no que elimina cualquier existencia de oxígeno disuelto en el sistema.

[10, 11]

3. Acetanogénesis: Esta etapa ocurre cuando las bacterias acetogénicas oxidan los ácidos volátiles en productos más sencillos, como acetato e hidrógeno. Se produce, en pequeñas cantidades, dióxido de carbono (CO₂), nitrógeno, dihidrógeno y compuestos de amoníaco. La caracteriza el mal olor producido por el ácido sulfhídrico (H₂S) que también se genera. [11]
4. Metanogénesis: En esta última etapa los compuestos finales como el dihidrógeno y el ácido acético, son tomados dentro de las bacterias metanogénicas convirtiéndolos en metano, dióxido de carbono y nitrógeno, además de sales de ácidos orgánicos. La fase de crecimiento de estas bacterias es menor que la de las etapas anteriores, por lo tanto esta etapa será en función de la cual se fije el tiempo de retención y la temperatura de trabajo del biodigestor. [11]

Las bacterias metanogénicas utilizan una serie de sustratos para generar metano (CH₄), como pueden ser dióxido de carbono (CO₂), dihidrógeno (H₂), acetato, metanol, metilamina y monóxido de carbono (CO), siendo las conversiones más usuales las siguientes [12]:



A continuación, un esquema acerca de los diferentes procesos de digestión y sus productos:

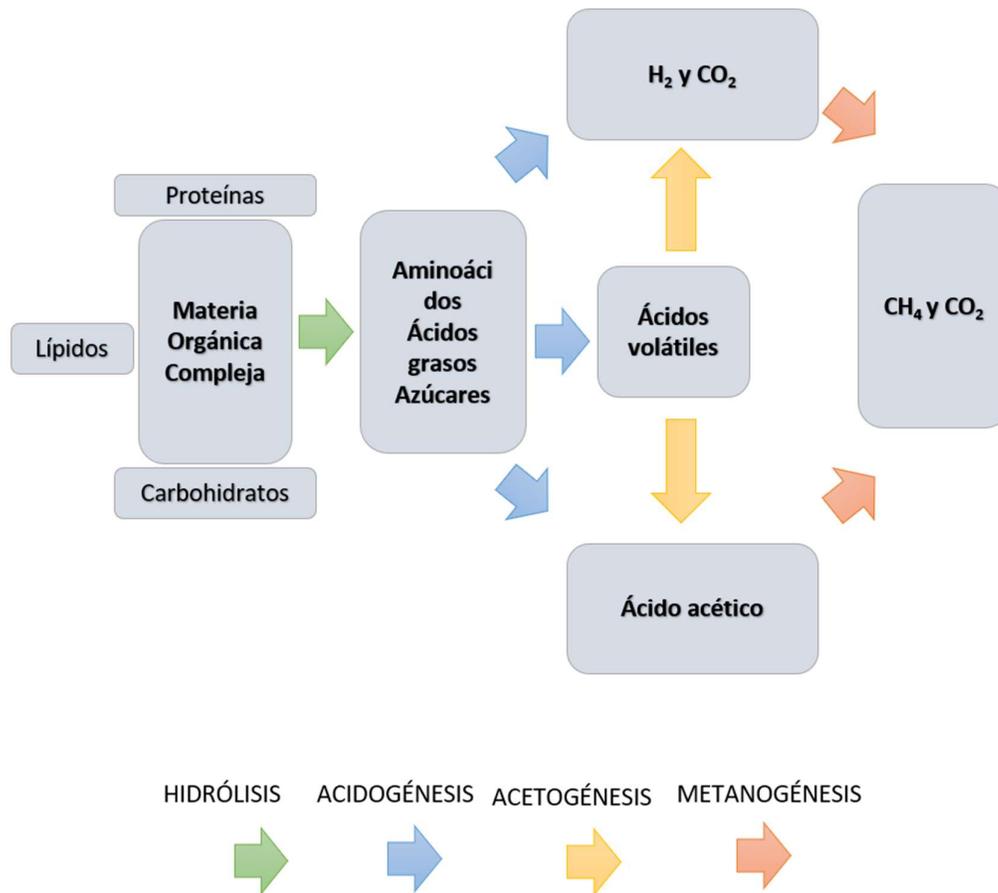


Figura 6: Esquema sobre los procesos de digestión y sus productos [13]

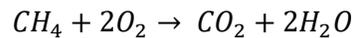
Entendido el funcionamiento de un biodigestor y conocido el proceso de digestión que se lleva a cabo en el reactor, es necesario entender las numerosas ventajas de los efluentes del proceso: el biogás y el bioabono.

2.4 BIOGÁS

Biogás es el nombre que recibe la mezcla de gases producida por la fermentación anaeróbica de materia orgánica. En general, el biogás producido, contiene alrededor de un 60% de gas metano (CH₄) y un 40% de dióxido de carbono, con trazas menores de otros gases como

nitrógeno, hidrógeno y gas sulfhídrico [14]. Según el caso, el gas metano puede llegar a representar proporciones mayores.

El alto poder calorífico del gas metano es el que hace al biogás un subproducto tan interesante. La combustión del biogás es representada por la siguiente ecuación: [9]



Y se puede apreciar el potencial de este gas en la siguiente tabla comparativa, donde se ve que el valor calorífico del biogás se acerca mucho al del gas natural. De hecho, el valor calorífico del gas metano y en natural es el mismo, al ser la composición del biogás de solo el 60-70% de metano, este valor se reduce:

Tabla 2: Valor calorífico de distintos gases [9]

	<i>Valor calorífico (Kwh/m³)</i>
Biogás	7
Gas natural	10
Gas propano	26
Gas Metano	10

2.4.1 USOS DEL BIOGÁS

Como uso más común del biogás está la obtención de calor (energía térmica). En zonas en las que escasea el combustible el biogás resulta bastante útil, realizando funciones tan básicas como calentar agua o cocinar.

También es utilizado a la hora de generar electricidad o combinaciones de calor y electricidad. Para ello se pueden utilizar turbinas de gas con muy bajo mantenimiento, aunque lo más común sea utilizar turbinas de combustión. Sin embargo este uso presenta

una pega, y es que es totalmente necesario deshacerse casi por completo del agua y el ácido sulfhídrico.

Por último también es posible utilizar el gas como combustible para vehículos adaptados para el uso de gas natural. Sin embargo, su baja velocidad de encendido o la costosa conversión de los motores son dos de las muchas razones por las que este uso tiene una difícil difusión. [9]

En zonas rurales pobres como Mount Darwin, el uso de este biogás es siempre la generación de energía térmica. Este uso no requiere un acondicionamiento muy exhaustivo del gas ni infraestructura especial, lo que es vital cuando el presupuesto es mínimo, como en estas comunidades.

2.4.2 TRATAMIENTO DEL BIOGÁS PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA

Según el uso que se le quiera dar al biogás, se hacen necesarios distintos procesos de purificación. A continuación una tabla en la que visualizar la complicación según el uso:

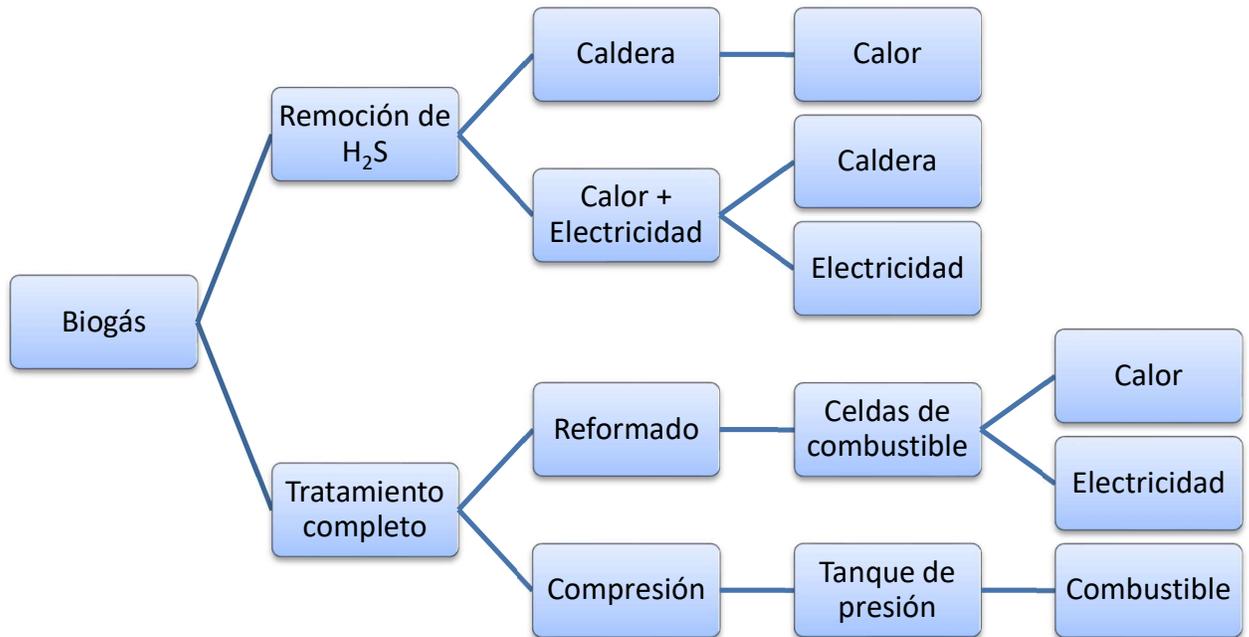


Figura 7: Esquema de los diferentes tratamientos según el uso del biogás [9]

En el caso que compete a este trabajo, que es obtención de calor, únicamente se hacen necesarias dos acondicionamientos: la remoción del ácido sulfhídrico y la remoción de agua.

2.4.2.1 Remoción de agua

Habitualmente, cuando el biogás abandona el reactor, se satura con vapor, producto generado de la fermentación anaeróbica. Se quiere prevenir el condensado del agua en las tuberías de transporte de gas, para lo que se hace necesario que el gas tenga una humedad relativa inferior al 60%. [15]

Para la purga de agua se utilizarán trampas de agua, que son muy sencillas. Consisten en recipientes que atrapan el agua cuando la corriente se encuentra con las mismas. Es necesario

que estén equipadas con un grifo de purga para evacuar el agua depositada en el fondo de la trampa. Un recipiente como el siguiente sería suficiente:



Figura 8: Recipiente para una trampa de agua

2.4.2.2 Remoción de ácido sulfhídrico (H_2S)

El ácido sulfhídrico es tóxico en concentraciones superiores a 100 ppm. Además, en combinación con vapor de agua puede llegar a general ácido sulfúrico, que es muy corrosivo. Por todo ello se hace necesario deshacerse de este ácido.

Para ello se utilizan trampas de ácido sulfhídrico. Consisten en tramos de tubería que se puede retirar. Dentro irá el filtro, que es una malla de hierro oxidado. [15] Esto se debe a que el ácido sulfhídrico en presencia de hierro precipita como azufre, a la vez que el hierro se oxida a hierro III.

La trampa se suele situar justo antes de la cocina para que sea fácil reemplazarla en su debido momento. Justo antes del filtro, irá una llave, para poder cortar el gas cuando queramos cambiar el filtro. Es sencillo saber cuándo hay que cambiar el filtro, ya que a la cocina empieza a llegar un olor desagradable a podrido; esto quiere decir que hay que sustituir la malla.

A continuación un ejemplo de cómo puede ser una trampa de ácido sulfhídrico. Se ve como en los laterales tiene roscas de forma que ese tramo se puede retirar. Y, aunque no se aprecia, debe tener mínimo una llave en el lateral que da al biodigestor.



Figura 9: Filtro de ácido sulfhídrico (H₂S) [diseño]

2.5 BIOABONO

La digestión anaeróbica de la materia orgánica genera un residuo útil debido a sus excelentes propiedades como fertilizante, incluyendo un alto nivel de nitrógeno, fósforo y potasio. En promedio, tiene un 8,5% de materia orgánica, 2,6% de nitrógeno, 1,5% de fósforo, 1% de potasio y un pH de 7,5. [16]

Este bioabono no presenta malos olores y en caso de que sea líquido se puede aplicar directamente al terreno. Si es sólido, puede deshidratarse y almacenarse para su uso posterior.

2.5.1 BIOABONO COMO ACONDICIONADOR Y FERTILIZANTE

El bioabono actúa gracias a su composición como acondicionador, teniendo como papel principal la restitución al suelo de la materia orgánica estable, previniendo la erosión y aumentando la permeabilidad del suelo.

Otra función importante es la de fertilizante:

En el caso de biodigestores continuos, el biofertilizante es líquido y se aplicará directamente.

En los biodigestores semicontinuos, el biofertilizante se obtiene en estado sólido. Este, tras ser secado, es tan válido como el biofertilizante que se obtiene líquido.

En comunidades rurales y pobres como la de Mount Darwin, que dependen de la agricultura, es evidente que este subproducto resulta una ayuda importantísima.

2.6 TIPOS DE BIODIGESTORES

Conocido todo el proceso presente en un biodigestor, las reacciones químicas y los productos, es importante conocer los distintos tipos de biodigestores, sus diferencias y ventajas, para escoger el más beneficioso para una zona rural sin recursos.

Hay numerosos tipos de biodigestores y se diferencian notablemente en función de su propósito y complejidad. A continuación, un diagrama distinguiendo los tipos de biodigestores:

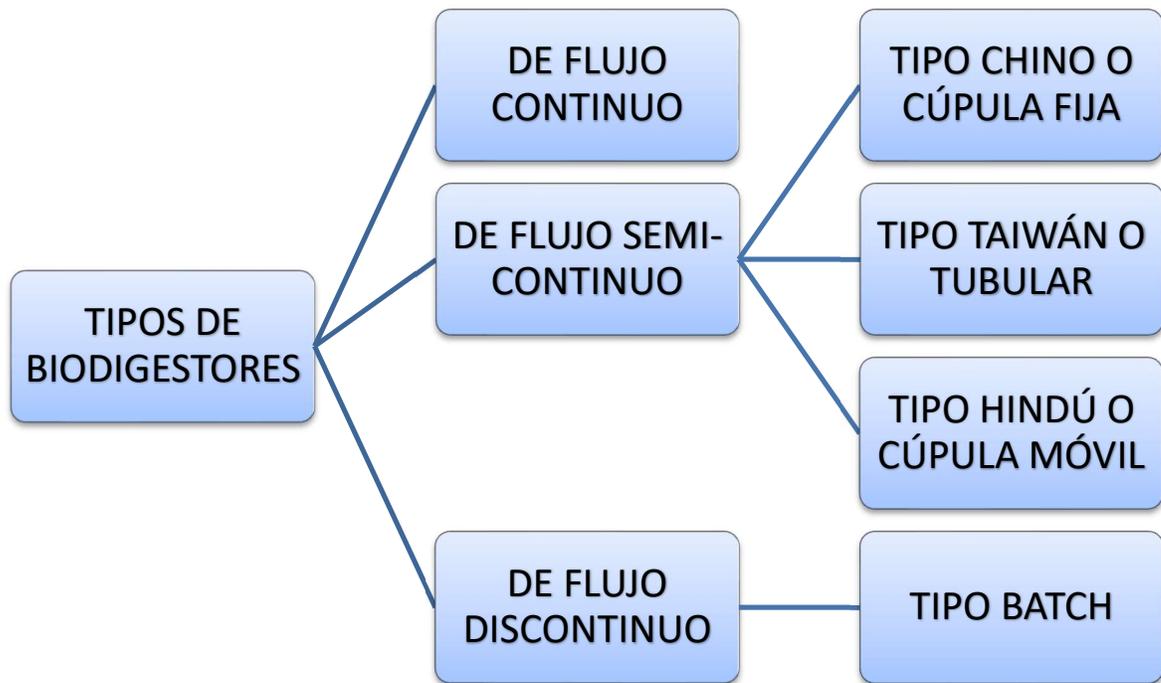


Figura 10: Esquema sobre diferentes tipos de biodigestores

La distinción más notable recae en el flujo de carga, existiendo biodigestores de flujo continuo, de flujo semicontinuo y de flujo discontinuo.

2.6.1 BIODIGESTORES DE FLUJO CONTINUO

Los biodigestores de flujo continuo corresponden a aquellos cuya alimentación es un proceso ininterrumpido, la carga es la misma que el efluente y la producción de biogás es continua día a día. Son reactores de muy grande capacidad utilizadas para tratamiento de aguas negras, en plantas industriales. La producción de biogás también es muy grande, y se suele aplicar en aplicaciones industriales. Son los más complejos, requieren de un control específico de calefacción. En el caso que compete a este trabajo, una comunidad rural sin recursos, este tipo de biodigestor no resulta útil ya que utiliza una tecnología muy sofisticada y reactores

demasiado grandes, que no serían capaces de controlar ni de reparar si se diese el caso. Además, el presupuesto también sería un problema.

2.6.2 BIODIGESTORES DE FLUJO DISCONTINUO

Los biodigestores de tipo discontinuo, también conocidos como digestores “batch”, son alimentados con grandes cargas individuales, que se dejan reposar un período de tiempo. Tras dicho período la fermentación de las materias primas disminuye, y con ella también la cantidad de biogás generado. En ese momento se vacía el reactor y se prepara una nueva carga. [9] Este tipo de biodigestores está más orientado a explotaciones agropecuarias que presentan materias difíciles de digerir anaeróbicamente. Su uso a escalas domésticas no es óptimo, por lo que se descarta en la situación concreta de este caso. A continuación una representación esquemática de las fases en un digestor tipo batch:

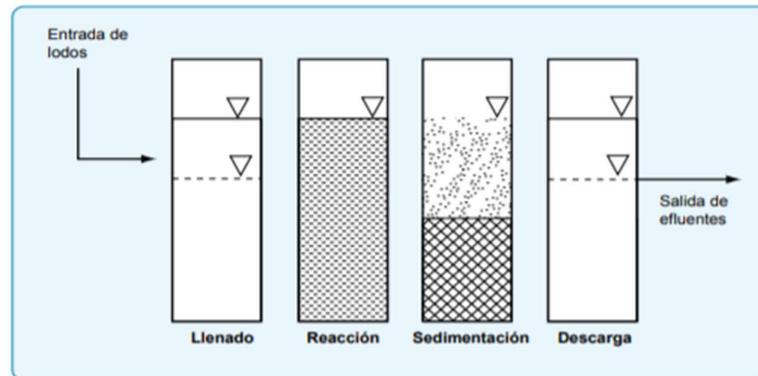


Figura 11: Etapas en un biodigestor de flujo discontinuo (tipo batch) [9]

En un primer momento el reactor se encuentra vacío. Suceden estas 4 fases y en la fase de descarga se vacía por completo, para comenzar de nuevo el mismo procedimiento.

2.6.3 BIODIGESTORES DE FLUJO SEMI-CONTINUO

Solo restan los biodigestores semi-continuos. Corresponden a aquellos biodigestores en los que existe una primera carga de tamaño considerable, a la que siguen pequeñas cargas interválicas (diarias o cada doce horas). Son los más utilizados en los medios rurales, cuando se trata de sistemas pequeños o medianos. Por ello, serán en los que se centre este trabajo.

Dentro de los biodigestores semi-continuos destacan tres tipos distintos: el biodigestor de cúpula móvil o tipo hindú, los de cúpula fija o tipo chino y los tubulares o tipo Taiwán.

2.6.3.1 Biodigestores de tipo chino o de cúpula fija

Los de tipo chino son tanques cilíndricos con el techo en forma de domo (cúpula) y están completamente enterrados, algo que es muy común en biodigestores para aislarlos térmicamente. Son semi-continuos, de forma que se llenan con una primera carga grande y luego es cargado diariamente. No tiene gasómetro, es decir, el gas se almacena en el propio reactor, y a medida que se genera gas aumenta la presión y fuerza a los lodos de entrada y al efluente a subir. [11]

Las plantas de domo fijo solamente son recomendables cuando pueden ser supervisadas por técnicos experimentados. Esto se debe a que una pequeña fractura en la cúpula fija causa altas pérdidas de biogás, y no son de reparación sencilla. [15] Conociendo estos detalles, es evidente que se descarta su construcción en zonas rurales sin medios, ya que no van a disponer de ningún técnico.

A continuación un esquema de cómo sería un biodigestor de este tipo:

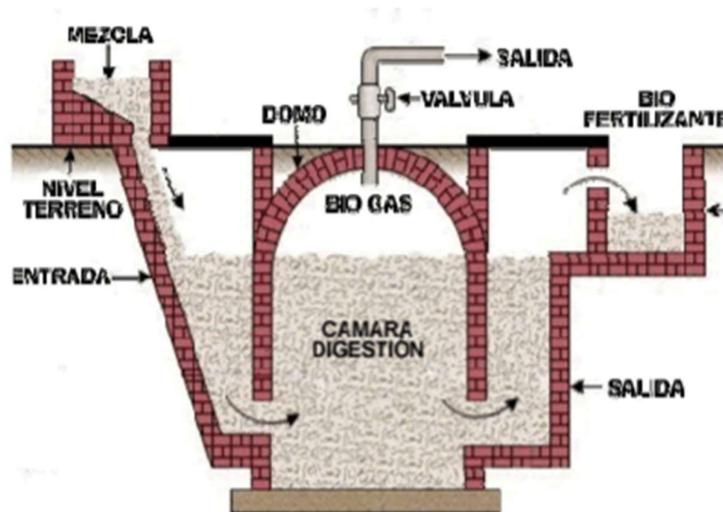


Figura 12: Esquema de un biodigestor de cúpula fija [17]

Viendo la figura se observa como en este caso el biogás tiene una cámara fija y se entiende el aumento de presión que causaría un aumento de volumen del gas. Además, es evidente que una grieta resultaría en la pérdida total del biogás.

2.6.3.2 Biodigestores de cúpula móvil o hindú

El biodigestores de cúpula móvil o hindú consisten en un reactor subterráneo y una cúpula-recipiente móvil para el gas. La carga diaria que entra por gravedad hasta el fondo del pozo, además de agitar la mezcla, genera una salida de lodos igual a la carga.

El recipiente flota directamente sobre la mezcla en fermentación y el gas se almacena en el mismo. Además, sube o baja en función de la cantidad de gas que contenga. En este caso la presión que ejerce el gas es siempre la misma, cambiando únicamente la posición del recipiente que puede subir o bajar. [11]

Resulta un problema en este biodigestor los altos costes de producción del tambor de acero y la susceptibilidad a corrosión. [15]

A continuación un esquema de cómo sería un biodigestor de este tipo:

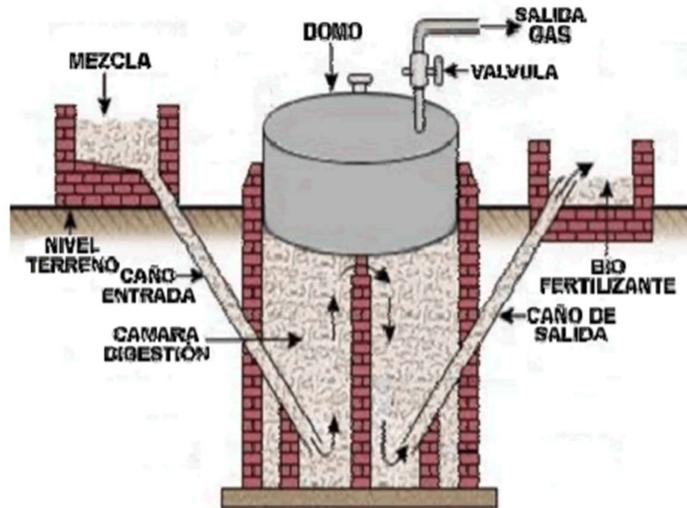


Figura 13: Esquema de un biodigestor de cúpula móvil [Manual de diseño y de difusión de biodigestores familiares, con enfoque en biodigestores tubulares]

Se aprecia en este caso un contenedor en el que está contenido el gas. Además, se ve como este contenedor puede subir y bajar manteniendo siempre la presión constante.

2.6.3.3 Biodigestores tubulares o tipo Taiwán

Los biodigestores tubulares constan de una planta de plástico en forma cilíndrica y alargada, que suele estar enterrada. En este tubo se almacena tanto la mezcla que constituye la masa de fermentación como el biogás. La parte inferior de la planta constituye alrededor de un 75% del tubo y almacena la mezcla, mientras que el 25% restante superior, almacena el biogás.

El flujo de materia es horizontal y se instala levemente inclinado de forma que la materia va de una punta a otra del tubo. En una punta se sitúa la entrada de carga y en la otra la salida de bioabono. Con cada carga diaria sale una cantidad proporcional de efluente. Aunque cambie la instalación, el funcionamiento es similar al del biodigestor de cúpula fija.

A continuación una ilustración de un biodigestor tubular donde se ve claramente el funcionamiento explicado y donde, además, añade una válvula de seguridad y un contenedor ovalado que hace referencia a un reservorio de gas.

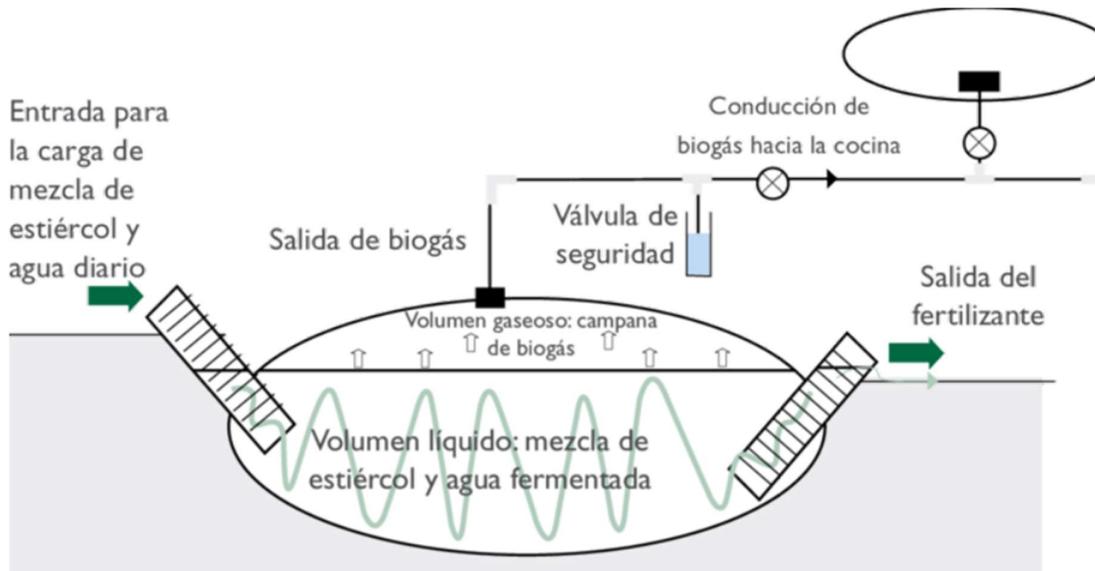


Figura 14: Esquema de un biodigestor de tipo tubular [Manual de diseño y de difusión de biodigestores familiares, con enfoque en biodigestores tubulares]

Los reservorios de gas no son estrictamente necesarios, pero son de gran ayuda si queremos aumentar la presión del gas o almacenar cantidades de gas. Suelen consistir en bolsas de plástico instaladas a través de una tee, antes de la cual suele haber una llave para obligar al gas a ir a la cocina (o cualquier zona a la que tenga que ir el gas). Se pueden fabricar de exactamente la misma forma que hacemos con el biodigestor, pero llenándolo solo de biogás.

Las válvulas de seguridad o alivio son indispensables. Garantiza una salida de emergencia en caso de que se acumule demasiado biogás, evitando que el biodigestor explote, u otros daños causados por exceso de gas. Se construyen sencillamente con una botella de plástico, una tee, un trozo de tubería de plástico y agua. Se debe conectar la tee a la conducción de gas y a la misma tee se conecta el tubo y la botella de agua, de forma que se hunde el tubo en tanta agua como presión máxima deseemos. La siguiente imagen ilustra en que consistiría una de estas válvulas de seguridad:

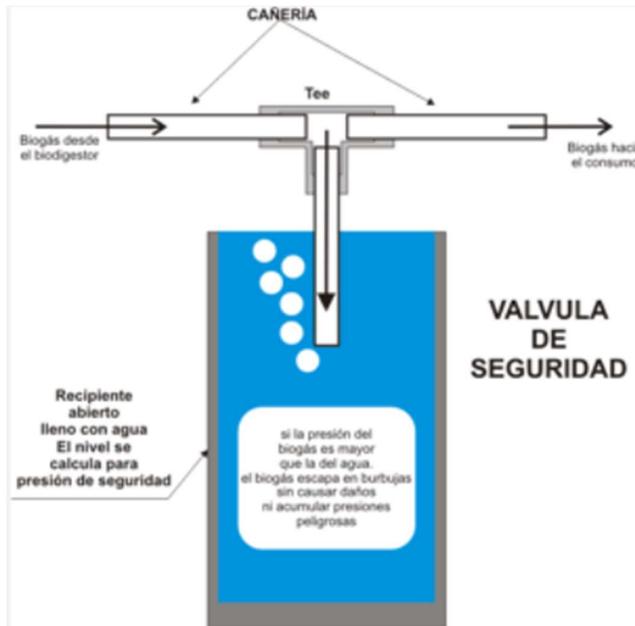


Figura 15: Esquema de una válvula de seguridad [18]

La instalación y preparación del emplazamiento es muy sencilla, y el mantenimiento del reactor también lo es, de forma que cualquiera puede llevar a cabo una reparación. Los materiales de construcción son de transporte fácil y resulta el biodigestor más barato.

Conocido el bajo presupuesto y la escasez de mano cualificada de la que se dispone, estos biodigestores tienen ventajas muy importantes y que lo hacen el más indicado para este caso.

Dentro de los biodigestores tubulares, se distinguen los de material de plástico (polietileno) y de geomembrana (PVC). Un ensayo que se desarrolló en la Finca El Vergel, ubicada en la vereda Bellavista municipio de El Dovio, en zona de ladera de la cordillera Occidental del Valle de Cauca (Colombia), denominado: “Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino”, determinó que los resultados en cantidades de abono y biogás en ambos digestores era muy parecida. En este estudio se comprueba que la diferencia entre ambos es únicamente el costo que puede ser entre 2 y 3 veces mayor para el de geomembrana. Aunque en este experimento no se mide, la durabilidad del material PVC es a su vez mayor.

Dadas las circunstancias de bajos presupuestos, nos decantaremos por el polietileno por su bajo coste. Además, debido a los frecuentes desastres naturales en la zona, no compensa gastar en un material que aunque puede que dure más, se estropeará igualmente en una situación extrema, o por el descuido de acciones humanas o animales.

La única variante dentro del modelo taiwanés que falta por analizar es el biodigestor tubular con invernadero. Dichos biodigestores son muy comunes en las zonas andinas. Debido a las bajas temperaturas se hace necesario instalar un invernadero sobre los biodigestores. Las siguientes imágenes son de una experiencia que nace de una colaboración con la ONG Instituto para una Alternativa Agraria (IAA), que instala biodigestores con ánimo de incrementar la utilidad de los biodigestores (al instalar el invernadero) ya que estaban teniendo escaso éxito en Perú.



Figura 16: Ejemplos reales de biodigestores tubulares [19]

A pesar de que dicha experiencia fuese positiva se rechaza esta variante ya que las temperaturas presentes en Zimbabue no son tan bajas como en zonas andinas.

2.7 EXPERIENCIAS CON BIODIGESTORES EN ZONAS RURALES

En los años 70, con la crisis mundial de energía, los biodigestores cobraron especial importancia y se instalaron millones en países del sur de Asia como China o India. Desde entonces, los países emergentes son punteros en la utilización y desarrollo de esta tecnología. ONGs y fundaciones son los principales actores en la difusión de estas infraestructuras.

2.7.1 BIOGAS FOR BETTER LIFE, AN AFRICAN INITIATIVE

“Biogas African initiative” fue una Fundación que impulsó la construcción de biodigestores en Africa. Establecieron en 2007 la ambiciosa meta de mejorar la vida en 2 millones de viviendas implementando plantas de biogás.

A diferencia de en Asia, en África esta tecnología estaba muy en desuso. No se conoce el número exacto de plantas instaladas, pero se sabe que la mayoría fueron en Tanzania, superando las 4000 plantas. Desgraciadamente, cerca de un 60% de estas plantas dejaron de operar. Sin embargo, muchas otras plantas tuvieron éxito, y sirvieron para determinar que el adecuado uso de esta tecnología traían muchos beneficios para aquellos que se beneficiaban de la misma. [20]

En la mayoría de casos, la tecnología era introducida sin coste, con ánimo de que se expandiese y fuera implementada en otros lugares, vistos los beneficios que aportaba. Esto no fue así, y finalmente la mayoría de plantas se abandonaron. Aunque existe una excepción, Tanzania, donde las plantas se construyeron con una base comercial, y no dejaron de operar.

2.7.2 BIOGÁS EN CHINA

Alrededor del 70% de la población vive en zonas rurales. En estas zonas no existen sistemas oficiales de manejo de basura, por ello los biodigestores tienen más de 100 años de historia en el país.

En 2003 se anunció el “National Rural Biogas Construction Plan”, que pretendía aumentar el número de biodigestores de 9 millones a 20 millones antes de 2005. A finales de 2008 existían 30.5 millones de biodigestores, con un potencial evaluado en 150 millones, y que cubriría el 55% de las viviendas rurales. [21]

Un ejemplo de éxito de esta tecnología, es el pueblo de Meili, en la provincia de Zhejiang. Dicho pueblo produce anualmente 28000 cerdos, 10000 patos, 1 millón de anadones y 100000 pollos. En 2001 invirtieron 1,2 millones de Yuanes en construir digestores para tratar

30 toneladas de residuos. Esto produjo biogás suficiente para más de 300 viviendas y 7200 toneladas de fertilizante por año. [22]

2.7.3 DEMOCRATIZACIÓN DE LOS BIODIGESTORES EN LATINOAMÉRICA

En toda Latinoamérica se desarrolla un proceso de difusión similar en cuanto a la implementación de biodigestores. La Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ) impulsa las primeras instalaciones de biodigestores en la década de los 70. La mayoría de los mismos, de domo fijo. Hacia los 90 el apoyo a estos proyectos desaparece debido a la falta de cuidados y los altos costes de inversión en nuevos biodigestores (domo fijo) .[23]

En la primera década del nuevo milenio se recupera la tecnología de los biodigestores en Latinoamérica. Únicamente que esta vez, serán protagonistas los biodigestores tubulares, de polietileno o gemomembrana (PVC). Se hace visible el éxito que tienen estos biodigestores cuando muchas universidades empiezan a invertir en I+D para desarrollarlos.

Las diferentes experiencias con biodigestores dan resultados muy dispares y por ello en 2009 nace la Red de Biodigestores de Latinoamérica y Caribe (RedBioLAC), como espacio para compartir fallos y lecciones aprendidas. Comienza un movimiento en el que participan ONGs, universidades y pequeñas empresas para dar un impulso a los biodigestores.

Más adelante, instituciones con experiencias exitosas previas en Asia y África comienzan a evaluar la implementación de Programas Nacionales de Biogás (PNB). Estos planes están basados en el desarrollo de un mercado sostenible de biodigestores.

El éxito de los biodigestores de bajo costo (tubulares) en América Latina es una razón más para ser este tipo de biodigestor el que propongamos para el caso tratado en este trabajo, puesto que estos países se encuentran en unas condiciones similares a las existentes en Zimbabue.

Capítulo 3. DISEÑO E INSTALACIÓN DE BIODIGESTORES TUBULARES

Justificado el tipo de biodigestor que se va a implementar, en este capítulo se estudiará el tipo de carga en el mismo, la preparación del emplazamiento, la instalación del biodigestor, la puesta en funcionamiento y la conducción del biogás. Además, se revisarán todos los parámetros a tener en cuenta a la hora de diseñar un biodigestor tubular.

Todas las decisiones en torno al diseño se justificarán debidamente, teniendo en cuenta que el diseño propuesto únicamente es óptimo para una comunidad rural y sin recursos como la que se describe en este proyecto.

La materia orgánica disponible es la excreta humana de 110 individuos adultos. Tomando esta materia prima como la principal, se verá la necesidad de mezclarla debido a sus características y se justificará lo que se tomará como materia prima.

3.1 PARÁMETROS A CONTROLAR

Para que la fermentación anaeróbica suceda correctamente es necesario conocer las características de la materia orgánica a utilizar, la temperatura necesaria, el pH, entre otros parámetros que se van a estudiar a continuación.

3.1.1 RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO DE LA MATERIA ORGÁNICA

Prácticamente cualquier materia orgánica puede llegar a digerirse anaeróbicamente generando un biogás, que podrá ser de mayor o menor calidad. Esta calidad de biogás dependerá, en primer lugar, de los nutrientes presentes en la muestra.

Las bacterias metanogénicas, que son las que generan el metano y el dióxido de carbono, se alimentan de carbono y de nitrógeno. El nitrógeno lo utilizan para reproducirse mientras que

el carbono es una fuente de energía. Dichas bacterias consumen alrededor de 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que para una generación óptima de biogás, se debe tener una cantidad carbono muy mayor a la de nitrógeno. Para una digestión óptima, la cantidad de carbono debería ser de al menos 20 veces la de nitrógeno. A partir de una relación inferior a 8:1 se inhibe la actividad bacteriana, y no se podría dar la digestión de la materia orgánica.[9]

Asimismo, tampoco es óptimo tener una relación superior a 40:1, aunque como se verá a continuación, esto no va a ser un problema.

Tabla 3: Comparativa de las relaciones C/N en distintos estiércoles [24]

<i>Estiércol</i>	<i>Kg/día</i>	<i>Relación C/N</i>
Bovino (500 Kg)	10.00	25:1
Porcino (50 Kg)	2.25	13:1
Excretas humanas	0.4	3:1

En un principio se propone como materia orgánica las excretas humanas, ya que el biodigestor, además de generar biogás y fertilizante, está prestando solución a los problemas que presenta un sistema de saneamiento inexistente. Sin embargo, podemos comprobar en la tabla que las excretas humanas no tienen más que 3 cantidades de carbón por cada cantidad de nitrógeno. Como solución a este problema se propone hacer una mezcla de materia orgánica, de forma que se mezclarán cantidades de estiércol animal con excretas humanas hasta obtener un mínimo de 15:1 en relación carbono:nitrógeno.

Tabla 4: Comparativa de las cantidades en % de C y N en distintos estiércoles [24]

<i>Residuos animales</i>	<i>%C</i>	<i>%N</i>
Bovinos	30	1.3

Porcinos	25	1.5
Excretas humanas	2.5	0.85
Ovinos	35	1
Caprinos	40	1
Gallinas	35	1.5

En el caso de que se tenga acceso a residuos caprinos esto sería lo óptimo, ya que es el que mayor contenido en carbono presenta. Sin embargo, hay que adaptarse a los residuos que se puedan obtener en la comunidad.

La ecuación de la que servirse para calcular una nueva relación de C/N si se mezclan residuos, o la cantidad de un residuo necesaria para cambiar la relación a un valor determinado, sería la siguiente:

Ecuación 1: Cálculo de la relación entre C y N al mezclar estiércoles

$$\text{Relación } \frac{C}{N} = \frac{\text{Kg residuo 1} * \text{concentración C} + \text{Kg residuo 2} * \text{concentración C}}{\text{Kg residuo 1} * \text{concentración N} + \text{Kg residuo 2} * \text{concentración N}}$$

3.1.2 CANTIDAD DE SÓLIDOS TOTALES

Todos los estiércoles están formados por agua y sólidos totales. Para una reacción adecuada dentro del biodigestor hay que controlar el nivel de sólidos totales. Para una movilidad adecuada de las bacterias metanogénicas, debe haber unos niveles máximos de sólidos totales en la mezcla. En general, los sólidos totales no deben superar el 12% de masa de la mezcla. Para asegurar un funcionamiento adecuado, se harán los cálculos para un 6% de sólidos totales, dando un margen en caso de tener más sólidos totales en las muestras de estiércol.

Tabla 5: % de sólidos totales en distintos residuos [25, 8]

<i>Residuos animales</i>	<i>% Sólidos Totales</i>
Bovinos	14
Porcinos	13
Gallinas	90.2
Humanaza	27

Para obtener un 6% de sólidos totales la materia prima, hay que añadir agua a los residuos animales. Todos los residuos tienen un porcentaje por encima del 12%, así que sin excepción habrá que hacer una mezcla. La ecuación de la que servirse para calcular el volumen de agua sería la siguiente (los puntos suspensivos sería en caso de haber 3 o más residuos en la mezcla, habría que añadirlos de la misma forma que el residuo 1 y 2):

Ecuación 2: Cálculo de la cantidad de agua necesaria para un % de sólidos totales

$$\frac{Kg\ SS.TT.\ residuo\ 1 + Kg\ SS.TT.\ residuo\ 2 + (...)}{Kg\ totales\ residuo\ 1 + Kg\ totales\ residuo\ 2 + (...) + Kg\ agua} = \% \text{ deseado}$$

La cantidad de agua calculada puede resultar totalmente absurda (un número de litros muy alto), ya que en zonas rurales como para las que se está diseñando no hay un suministro de agua diario de este nivel. Sin embargo, hay una solución muy eficiente para el problema. Parte del efluente diario, se puede mezclar nuevamente con la carga diaria. Es decir, una vez filtrados los sólidos del efluente, podemos mezclarlo con los estiércoles del día, para generar la nueva carga. No es ni mucho menos una solución mala, ya que la reconducción del biol mejora la calidad del biogás que se produce. La única desventaja de llevar a cabo esta práctica sería que se está perdiendo mucho fertilizante, ya que en vez de ir directo a los cultivos, se está recirculando.

3.1.3 TEMPERATURA Y TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH)

Dependiendo de la temperatura de trabajo del biodigestor, existirán microorganismos distintos que llevarán a cabo la digestión anaeróbica. Existen tres intervalos distintos de temperatura: las temperaturas termófilas, mesófilas y psicrófilas.

Tabla 6: Microorganismos presentes en la fermentación anaerobia en función de la temperatura [26]

<i>Microorganismos</i>	<i>Temperaturas</i>	<i>TRH</i>
Psicrófilos	< 30 °C	+ 100 días
Mesófilos	30 – 40 °C	20 – 60 días
Termófilos	50 - 60 °C	10 – 15 días

Los microorganismos más activos son los de mayores temperaturas, y son con los que la digestión anaeróbica se llevará a cabo más rápidamente. Nunca se ha trabajado con temperaturas menores a 30 °C en biodigestores tubulares ya que requeriría un volumen de biodigestor demasiado elevado.

El tiempo de retención hidráulico es el período de tiempo que permanece la materia orgánica dentro del sistema para alcanzar la degradación, y está estrechamente relacionado con la temperatura del biodigestor. A temperaturas más altas existirán microorganismos más activos que llevarán a cabo la biodigestión en menor tiempo.

En climas más cálidos, el calor ambiental es suficiente para que la temperatura de trabajo del biodigestor sea alta, y por lo tanto el tiempo de retención más bajo. En zonas en las que las temperaturas no lo son tanto, existen dos opciones: aumentar el tiempo de retención o incluir un invernadero en el diseño del biodigestor.

En condiciones ideales, con una temperatura promedio de 30 °C, el tiempo de retención hidráulico debería ser de 20 días. El tiempo de retención a una temperatura menor de 30° es

difícil de calcular debido a las variaciones de temperatura. Se puede aproximar mediante un factor de corrección obtenido de la siguiente gráfica:

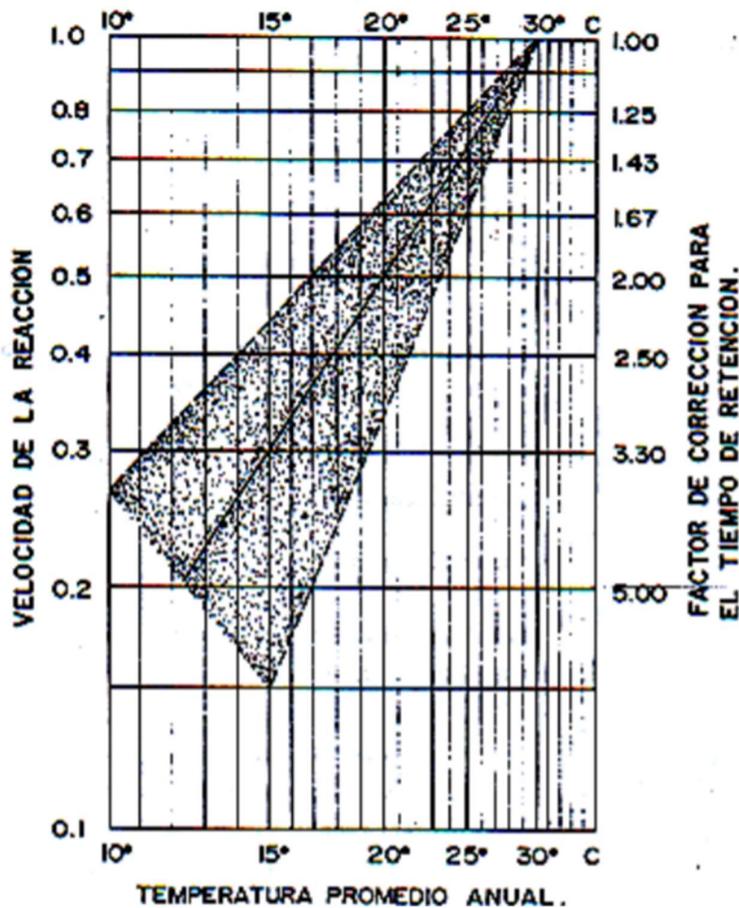


Figura 17: Gráfico para el cálculo del factor de corrección [27]

Por ejemplo, para una temperatura media de 15 °C, el factor de corrección sería 3.3. Y se utiliza de forma que el nuevo tiempo de retención será:

Ecuación 3: Cálculo del tiempo de retención según el factor de corrección

$$TR = \text{Factor de corrección} * \text{tiempo de retención ideal (30 °C)}$$

De esta forma, el tiempo de retención utilizado en este proyecto sería de 66 días y se estará trabajando en temperaturas cerca de 30 °C.

3.1.4 pH

Este parámetro afecta al crecimiento de los microorganismos durante la fermentación. Un pH ácido causa la inhibición de las bacterias metanogénicas. Esto sucede cuando el pH cae por debajo de 6. La inhibición de las bacterias metanogénicas, que son las que generan el CH₄, resulta en un descenso importante de la calidad del biogás. Además, la actividad metanogénica en un pH superior a 8 también cae drásticamente.

En la siguiente gráfica, donde se compara la composición del biogás en función del pH en mezclas de guano y tuna, se visualiza la total importancia de mantener el pH por encima de 6 y por debajo de 8:

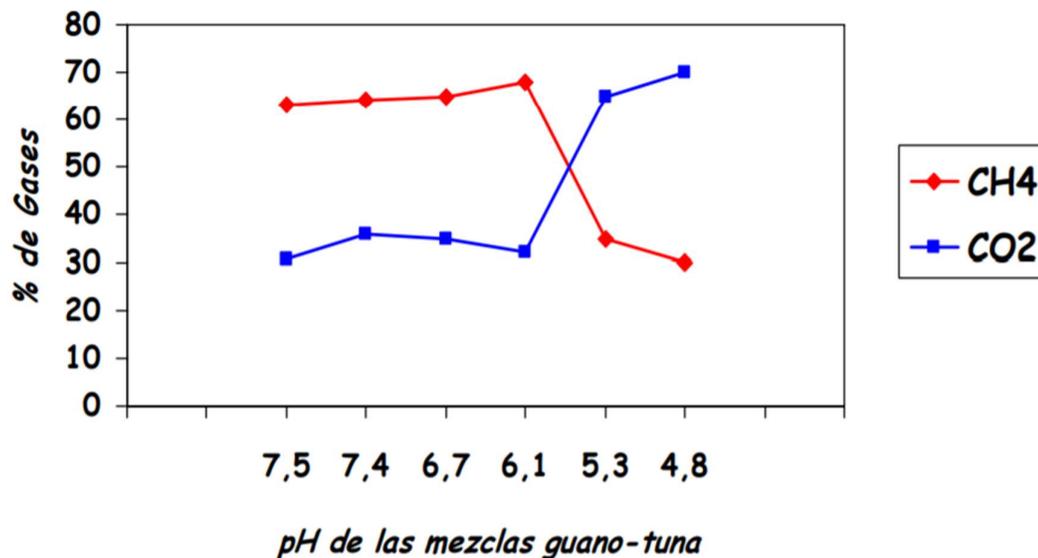


Figura 18: Composición del biogás en función del pH de las mezclas de guano-tuna [28]

El pH deseado para que el biodigestor funcione correctamente se consigue ajustando el pH de las propias materias primas. En principio no debería haber ningún problema, ya que el pH de estiércol bovino es neutro (7) y la excreta humana ligeramente ácida, entre 6 y 7, por

lo que la mezcla con el agua debería generar una materia orgánica muy ligeramente ácida que sería perfectamente factible para usar en el biodigestor.

3.2 DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR

3.2.1 VOLUMEN DEL BIODIGESTOR

El dimensionamiento del biodigestor es tarea fácil una vez se establecen todos los parámetros. Es evidente que:

Ecuación 4: Cálculo del volumen del biodigestor

$$\text{Volumen biodigestor} = \text{Volumen mat. orgánica} + \text{Volumen biogás}$$

Donde la mat. orgánica ocupa un 75 % de reactor y el biogás un 25 %.

Conocido el tiempo de retención hidráulica y la carga diaria (su volumen):

Ecuación 5: Cálculo del volumen de materia orgánica

$$\text{Volumen mat. orgánica} = \text{carga diaria} * \text{tiempo de retención hidráulico}$$

Como este volumen ocupa el 75%:

Ecuación 6: Cálculo del volumen de biogás

$$\text{Volumen biogás} = \text{Volumen mat. orgánica} / 3$$

Por lo que únicamente falta dimensionar el volumen de materia orgánica, ya que en el apartado de parámetros se ha calculado el peso de la carga diaria. Tomando como aproximación que 1 Kg de estiércol es 1L se tendría:

Ecuación 7: Cálculo del volumen de carga diaria

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

Realizados los cálculos anteriores se obtiene el volumen del biodigestor.

3.2.2 DIMENSIONES DEL BIODIGESTOR

Para poder hablar de un biodigestor tubular, la relación entre la longitud y el diámetro del reactor, tiene que estar entre 5 y 10. En caso de ser menor de 5 el material orgánico podría llegar demasiado pronto a la salida, sin llegar a digerirse debidamente. Al superar la relación puede haber problemas de deformaciones o acumulaciones de lodos, ya que la carga diaria no llegaría a generar un movimiento en puntos tan alejados del digestor. Se establece como una relación óptima 7,5. [6]. Conocido el volumen de un cilindro, la relación entre la longitud y el diámetro, y el volumen de materia orgánica y biogás, se calcula el radio y la longitud:

Ecuación 8: Relación óptima entre la longitud y el diámetro del biodigestor

$$L = 7,5 * D = 15 * r$$

Ecuación 9: Cálculo del radio-longitud del biodigestor conocidos el volumen del biodigestor y la ecuación 8

$$\text{Volumen biodigestor} = \pi * r^2 * L$$

La relación entre radio y longitud puede variar en función del material disponible.

Es muy común establecer en primer lugar las dimensiones del biodigestor (no siempre hay el material de las dimensiones que se necesita), y posteriormente se calcula la cantidad de materia que puede almacenar. En este caso, como se quiere aprovechar al completo las excretas humanas de las que se va a disponer, se estableció en un primer momento el volumen de materia orgánica y biogás y en función de eso las dimensiones del biodigestor.

3.3 VOLUMEN DE BIOGÁS

Es necesario hacer unos cálculos aproximados acerca del biogás que se espera generar. Una vez aproximado, se compara con el volumen de biodigestor disponible para el biogás. En caso de ser necesario, se valora la posibilidad de manejar reservorios de gas, para que el sistema no se vea obligado a expulsar gas para evitar daños en el reactor, y poder aprovechar ese gas en otro momento que si se necesite.

Para ello, nos servimos de los siguientes datos:

Tabla 7: Volumen de biogás por Kg de estiércol bovino y humano [24]

<i>Estiércol</i>	<i>Volumen de biogas (m³/Kg)</i>
Bovino	0.04
Excretas humanas	0.06

Se puede calcular de forma aproximada el volumen de gas generado al día con estos datos:

Ecuación 10: Cálculo del volumen de biogás generado diariamente

$$\text{Volumen de gas (m}^3\text{)} = \text{Kg estiércol bovino} * 0.04 + \text{Kg excreta humana} * 0.06$$

Conocido el volumen de gas generado diariamente, se compara con el consumo esperado diario. Si la generación diaria es superior al consumo, es aconsejable instalar reservorios de gas, para no perder ese exceso de gas generado, y poder utilizarlo en una ocasión de uso extraordinario.

En la siguiente tabla se muestra el consumo aproximado de distintos utensilios:

Tabla 8: Consumo de biogás en m³/h en distintos utensilios [6]

<i>Utensilio</i>	<i>Consumo de biogas (m³/h)</i>
Lámpara a biogás	0.07
Cocina a biogás de dos hornillos	0.2 – 0.42
Olla arrocera	0.14
Generador eléctrico (600 W)	0.7 – 0.8
Calefón de agua (14 kW)	2.5

El único problema si no se instalasen reservorios de gas sería la pérdida del mismo, ya que en un principio nunca debería haber problemas con presiones demasiado altas de gas al haber instalado válvulas de alivio.

3.4 INSTALACIÓN DEL BIODIGESTOR

Se ha escogido y diseñado el biodigestor, y estudiado las distintos utensilios de los que se sirve para su correcto funcionamiento. A continuación, se explica el proceso de instalación, empezando por escoger la ubicación, cavado de la zanja, implantación del digestor y terminando por la conducción del biogás y los distintos utensilios que incorporar a las tuberías de conducción.

3.4.1 UBICACIÓN

Antes de nada se decide la ubicación del biodigestor. Para ello, se intenta escoger una zona con una serie de características, que son las siguientes:

1. En primer lugar, es importante escoger una zona donde no haya sombra. Como se ha explicado, el calor hace que la reacción se lleve a cabo más rápido y por lo tanto aumente el rendimiento del digestor. La orientación óptima es en paralelo a la trayectoria del sol, de forma que este incida sobre todo el biodigestor con la misma fuerza durante todo el día.
2. En segundo lugar, es aconsejable situarlo en las inmediaciones de las instalaciones destinadas a la recogida de los estiércoles y cerca de una fuente de agua. En este caso, en el que la mitad de la materia prima serán heces humanas, sería recomendable situarla cerca de las letrinas, ahorrando un esfuerzo diario de transporte.
3. Evitar zonas concurridas por personas o animales. El material propuesto para el biodigestor es polietileno, y tanto la acción humana como animal pueden causar destrozos en el mismo. Evitarlo es tan fácil como situarlo fuera de caminos.
4. Al mismo tiempo que se quiere evitar caminos y estar cerca de la recogida de estiércoles, es importante situarlo cerca de la cocina en la que se va a utilizar. De esta

forma hay un ahorro de tuberías para la conducción del gas. Además, cuanto menor longitud de tuberías menos posibilidad de fugas u otros inconvenientes.

Si una zona consigue cumplir estos cuatro puntos, será un punto idóneo para la construcción del biodigestor.

3.4.2 CAVADO DE LA ZANJA

La zanja es un elemento imprescindible y su función es de aislante térmico. Se excava una fosa para introducir el biodigestor, de forma que las variaciones de temperatura son mucho menores. Además, esta zanja actúa también como protección del polietileno que forma el digestor.

Por razones de estabilidad, esta zanja se excava en forma de chaflán, exhibiendo la siguiente forma:

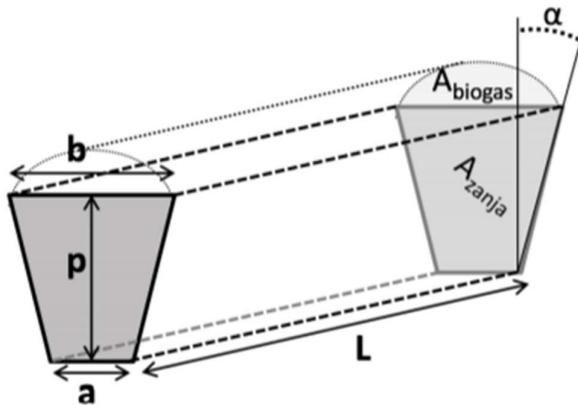


Figura 19: Dimensiones y parámetros de una zanja

Para cavarla adecuadamente, se marcan en el suelo el ancho inferior (el menor) y el superior. Se comienza cavando el ancho inferior, y, una vez terminado, simplemente se retiran los triángulos de tierra que sobran a ambos lados para obtener la forma de chaflán. Es importante retirar cualquier rama o piedra susceptible de rasgar el biodigestor en un futuro.

3.4.2.1 Dimensionado de la zanja

El volumen de esta zanja será el mismo que el volumen de materia orgánica en el biodigestor, de forma que la parte del digestor que contiene el biogás sobresale por encima de la misma.

El dimensionado óptimo de la zanja no es trivial, y en él intervienen una larga lista de parámetros. En el artículo “Design methodology for low cost tubular digesters” de J. Martí-Herrero, J. Cipriano, se desarrollan e iteran una serie de ecuaciones con el fin de obtener las dimensiones óptimas. En él se obtienen una enorme serie de relaciones para, y se han escogido las necesarias para el dimensionado de este trabajo en la siguiente tabla:

Tabla 9: Valores para dimensionado óptimo de una zanja [29]

α (°)	% V.L.	% V.B.	a (m)	b (m)	p (m)
15	76	24	1.02 * r	1.82 * r	1.49 * r
30	75	25	0.72 * r	2.26 * r	1.33 * r

(La r hace referencia al radio del biodigestor)

Observamos como el ángulo α , junto con los anchos a y b, y la altura p, van a determinar el volumen de líquido y de biogás que habrá disponible. En este trabajo se propone que el 75% del volumen sea materia orgánica y el 25% biogás, por ello escogemos las anteriores relaciones de todas las existentes.

Tanto el ángulo de 15 como de 30 atienden a las necesidades del biodigestor presentado. Sin embargo, no se va a poder escoger uno de ellos hasta escoger la ubicación exacta del proyecto. La preferencia entre un ángulo u otro va a depender del estado del terreno, si el terreno es arenoso se escogerá el ángulo de 30°, mientras que si es más arcilloso se escogerá el de 15°. [6]

Por último, en cada extremo de la zanja, y a p/2, se cava con un ángulo de 45° un agujero por el que pasarán los tubos de alimentación y de efluente:



Figura 20: Forma de una zanja vista lateralmente.

Por último, cuando se vaya a introducir en la zanja, es aconsejable cubrirla con algún tipo de plástico o lona, de forma que proteja al biodigestor.

3.4.3 MONTAJE DEL BIODIGESTOR

Antes de nada, tener en cuenta que se va a construir un biodigestor de polietileno, que es un material relativamente frágil, y hay que actuar con cuidado en todo momento.

Como se trata de un material frágil, el biodigestor se prepara con una doble o triple capa de plástico. Para ello, se siguen unos sencillos pasos:

1. Se estira una primera lona de plástico tubular, de circunferencia la del biodigestor y longitud que debe ser:

Ecuación 11: Cálculo de la longitud de la lona

$$L_{lona} = L_{biodigestor} + p * \sqrt{2} + p$$

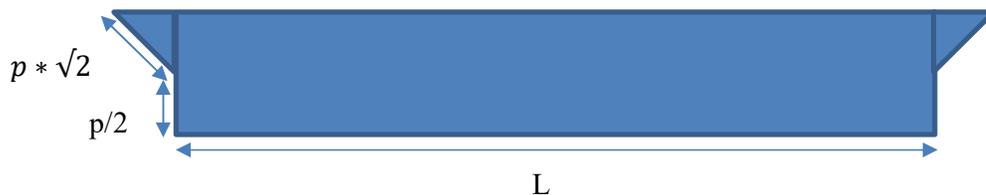


Figura 21: Cotas de la vista lateral de una zanja

La lona cubrirá la longitud total del biodigestor, una pequeña zona de acomodación del biodigestor que mide p/2 a cada lado (señalada en el dibujo), y una distancia de p * sqrt(2) que corresponde a la zona donde se une con las tuberías de alimentación y efluentes.

2. Se estira otra lona encima, asegurándose concienzudamente que mide exactamente lo mismo (cortando centímetros de más si es necesario).
3. A continuación, una persona descalza, y con sumo cuidado, coge el extremo de una de las lonas y la introduce por dentro de la otra, caminando hasta el final, formando la doble capa.
4. Por último, la salida del biogás. Se recomienda a pocos metros de alguno de los dos extremos. Se hará un pequeño corte en la parte que vaya a ser la superior, de forma que se pueda colocar una pequeña pieza llamada adaptador de tanque, que permite pasar el gas y cierra herméticamente por ambos lados de la lona. Tiene la siguiente forma:



Ilustración 2: Adaptador para tanque

3.4.4 TUBERÍAS DE ALIMENTACIÓN Y EFLUENTE

Una vez construido el biodigestor se montan las tuberías por las que van a entrar y salir los residuos. Se necesitan 2 tuberías de PVC de alrededor de 1,5 m de largo y 15 centímetros de diámetro y liga de neumático. [6].

Se va a dividir cada tubería en 3 tramos: uno inicial de 30 cm, otro de 50 cm y un último de 70 cm.

El tramo de 30 cm va a estar dentro del biodigestor, por lo que sería conveniente recubrir ese extremo con cinta aislante para no dañar al digestor cuando se introduzca. El tramo de 50 cm va a ser el que se amarre al digestor con la liga de neumático y el de 70 cm queda fuera del reactor. Se procede de la siguiente forma (en ambos lados): se introduce la tubería por un extremo del tubo de plástico, hasta la marca de los 70 cm. Se hacen pliegues con la manga de plástico entre las marcas de 30 y 70 cm, y se amarra la tubería firmemente, de dentro hacia fuera, con la liga de neumático. Se dan vueltas a la liga de neumático sin dejar ver absolutamente nada de plástico.

Una vez colocadas las tuberías, únicamente faltan las tuberías de conducción de biogás y ponerlo en funcionamiento.

3.5 CONDUCCIÓN DE GAS.

Desde la salida del biogás en el biodigestor hasta la cocina hay una serie de elementos necesarios que ya han sido comentados, tanto su función como su construcción:

1. Válvula de alivio. Será instalada inmediatamente después de la salida del biodigestor, antes de ningún otro elemento, como se explica en el apartado 2.6.3.3.
2. Trampa de agua. Será instalada a continuación de la válvula de alivio, como se ha explicado en el apartado 2.4.2.1.
3. Reservorio de biogás. Tal y como se explica en el apartado 2.6.3.3.
4. Trampa de ácido sulfhídrico, descrita en el apartado 2.4.2.2.
5. Las tuberías de unión serán de PVC, polietileno o manguera.
6. Serán necesarias 4 llaves de paso.
 - a. Una inmediatamente después de la válvula de alivio, de forma que se pueda utilizar el reservorio de gas si así se deseara.
 - b. Una que aisle el reservorio de gas, de forma que si se llena un reservorio entero se pueda cambiar por otro.
 - c. Las dos últimas, justo antes y justo después del filtro de ácido sulfhídrico, de modo que se puedan cambiar las mallas del filtro cuando sea necesario.

3.6 PLAN DE EJECUCIÓN

Este apartado pretende servir de guía para la instalación un biodigestor, paso a paso. Se recogen ideas planteadas en apartados anteriores y además se añaden otras, de forma que en un solo apartado se tenga el proceso completo de instalación.

Una vez completado este apartado, se pondría en marcha el biodigestor siguiendo las instrucciones del apartado 4.1:

3.6.1 OBTENCIÓN DE MATERIALES

En primer lugar y antes de comenzar a trabajar, es necesario hacerse con los siguientes materiales:

- 1 cilindro hueco de polietileno de dos veces la longitud de la lona (obtenida de la ecuación 11) y diámetro el calculado.
- 4 tees.
- Mínimo 2 adaptadores de tanque (1 para la salida del gas y 1 en caso de que se haga algún agujero en la lona).
- 1 válvula de alivio.
- 1 trampa de agua.
- 1 filtro de ácido sulfhídrico.
- 2 tuberías de PVC de alrededor de 1,5 m de largo y 15 centímetros de diámetro.
- Liga de neumático.
- 1 reservorio de biogás.
- 4 llaves de paso.
- Tuberías de unión de PVC, polietileno o manguera (no se sabe exactamente que longitud hasta el momento de instalación).
- Una lona grande de cualquier material que cubra la totalidad del agujero (para proteger el plástico).
- Pala y azada.

3.6.2 CAVADO DE LA ZANJA

Para realizar un agujero en condiciones es importante seguir una serie de pasos que se explican a continuación:

1. Dibujar los contornos especificados en el apartado 3.4.2, y comenzar a cavar el agujero interior siguiendo los siguientes pasos.
2. Aflojar la tierra dura con una azada (aflojarla con una pala es un trabajo muy exhaustivo y no recomendable).
3. Utilizar la pala para retirar la tierra aflojada con la azada. Una vez se hace demasiado dificultoso retirar tierra con la pala (por la altura), utilizar la azada.
4. Definir los laterales del agujero continuamente de forma que este no se estreche.
5. Repetir los pasos 2, 3 y 4 hasta cavar el agujero interior.
6. Rematar los laterales de la zanja definiendo la pendiente establecida (se cava con la pala en línea recta desde el contorno exterior pintado hasta el interior en el fondo del agujero).
7. Por último ayudarse de la azada para cava los agujeros de las tuberías.
8. Siempre ayuda tener un terreno de trabajo ordenado, por lo que se debe colocar una lona o algo parecido al lado de la zanja, para echar la tierra encima y guardarla para cualquier otra actividad.

3.6.3 INSTALADO DEL BIODIGESTOR

1. Se estira una primera lona de plástico tubular, de circunferencia la del biodigestor y longitud que debe ser:
2. Se estira otra lona encima, asegurándose concienzudamente que mide exactamente lo mismo (cortando centímetros de más si es necesario).
3. A continuación, una persona descalza, y con sumo cuidado, coge el extremo de una de las lonas y la introduce por dentro de la otra, caminando hasta el final, formando la doble capa.
4. Por último, la salida del biogás. Se recomienda a pocos metros de alguno de los dos extremos. Se hará un pequeño corte en la parte que vaya a ser la superior, de forma

que se pueda colocar una pequeña pieza llamada adaptador de tanque, que permite pasar el gas y cierra herméticamente por ambos lados de la lona.

5. Una vez manipulado el digestor, se pone en la zanja.

3.6.4 INSTALADO DE LAS TUBERÍAS

1. Primero, se divide cada tubería en 3 tramos, de 30, 50 y 70 cm en ese orden.
2. Se recubre el tramo de 30 cm con cinta aislante.
3. Se introduce la tubería en uno de los laterales del digestor por el tramo recubierto, hasta la marca de 70 cm.
4. Se hacen pliegues con la manga de plástico entre las marcas de 30 y 70 cm, arrimando el plástico a la tubería, y se amarra la tubería firmemente, de dentro hacia fuera, con la liga de neumático.
5. Se dan vueltas a la liga de neumático sin dejar ver absolutamente nada de plástico.

3.6.5 INSTALADO DE LA CONDUCCIÓN DE GAS

Para la instalación de la conducción de gas, se procederá conectando los siguientes elementos en serie, todos ellos unidos por tuberías de PVC, polietileno o manguera:

1. Válvula de alivio
2. Llave de paso
3. Tee, a la que se conecta la trampa de agua.
4. Tee, a la que se conecta una llave de paso y un reservorio de gas.
5. Llave de paso
6. Filtro de ácido sulfhídrico
7. Llave de paso.
8. Salida del biogás.

Una vez completado el plan de ejecución, el mecanismo está listo para la puesta en marcha, que se describe en el siguiente apartado.

Capítulo 4. FUNCIONAMIENTO Y MANTENIMIENTO

4.1 PUESTA EN MARCHA

Una vez construido el digestor y los sistemas de tuberías, ya solo queda iniciar el proceso.

4.1.1 INFLADO

Para llevar a cabo este paso, antes de nada, hay que colocar el biodigestor en su zanja, asegurándose de que la salida de biogás queda en la parte de arriba. Además, se va a cerrar la llave de paso justo después de la válvula de alivio (que ya estará montada y operativa).

El inflado sirve para acomodar el biodigestor en la zanja y eliminar todas las arrugas. Para ello será necesario subir y bajar la presión del aire interior hasta que quede debidamente colocado. El método de inflado no importa, desde un soplador eléctrico al tubo de escape de un vehículo. En el momento que la válvula de alivio comience a expulsar aire se puede dejar de inflar (se habrá alcanzado la presión máxima).

4.1.2 LLENADO DE AGUA

Tras el inflado, se procede a llenar el biodigestor hasta que se cubra las entradas de las tuberías, generándose un sello hidráulico. De esta forma, el aire que hay dentro está atrapado, que será lo que le suceda al biogás, cuando se genere.

A continuación, se procede a colocar las tuberías con la inclinación necesaria. La salida, debe estar tantos centímetros fuera, como centímetros hemos sumergido la tubería en la válvula de alivio. La entrada simplemente debe quedar por encima el nivel de la salida, de forma que cuando se introduzcan lodos salga la parte proporcional de los mismos por la salida. Se puede utilizar cualquier objeto o herramientas que se tengan a mano para fijar las tuberías. Quedaría como indica la siguiente figura:

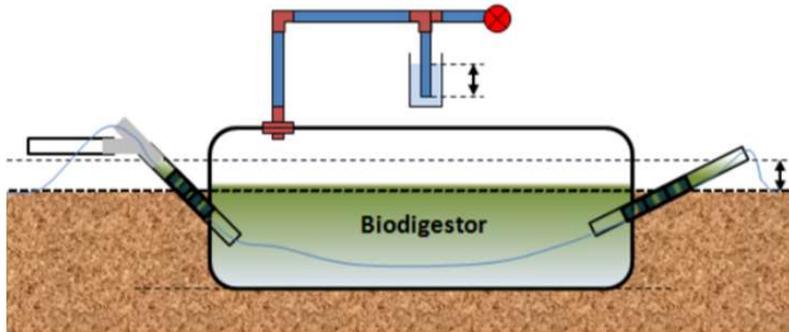


Ilustración 3: Colocación de las tuberías en función de la válvula de alivio [6]

Una vez colocadas las tuberías, se sigue llenando con agua hasta que la tubería de salida este rebose agua.

4.1.3 LLENADO DE ESTIÉRCOL

Habiendo cumplido todos los pasos anteriores, el biodigestor está listo para empezar a trabajar. Para ello, si es posible, se recomienda acumular una cantidad relativamente grande de estiércol, como primera carga. A partir de este momento, el biodigestor está construido y listo para trabajar de forma normal.

4.2 CARGA DIARIA

La operación diaria del biodigestor es muy sencilla. Únicamente hay que preparar la carga establecida en el diseño de biodigestor e introducirla. El bioabono obtenido ese día se puede o bien utilizar para mejorar los cultivos o se puede guardar para la carga del siguiente día, si no se dispone de mucha agua. Por último, el biogás producido ese día puede ser utilizado, almacenado o perdido, en cualquier caso esto no va a afectar al funcionamiento diario del digestor.

4.3 PRIMER GAS ÚTIL

Tras un período de 20 – 30 días, el biodigestor debería estar comenzando a producir biogás. Esto sería visible en la válvula de alivio, ya que al comenzar a generarse biogás, la presión

intentaría subir por encima del valor máximo, y el aire del primer inflado terminaría saliendo por la válvula de alivio, hasta solo quedar biogás.

Tras este período, se supone que ya hay generación de biogás y se hace una prueba. La prueba consiste en conectar una manguera a la salida del gas y prender [Manual del biogás]. Hay que tener cuidado, si la producción de biogás ha sido buena puede suceder que salga una llama muy grande. Si esto pasara, el biodigestor está funcionando correctamente. Si prende pero se apaga sola, hay que darle más tiempo, y se haría otra prueba en otra semana. El problema estaría en que no prendiese absolutamente nada. Esto significaría que solo se está produciendo dióxido de carbono, y habría que revisar el pH de la mezcla del biodigestor, ya que como se muestra en la figura (), cuando el pH es más bajo de lo necesario la producción de metano cae en picado mientras que la de dióxido de carbono se dispara.

Respecto a la producción del bioabono, se podrá empezar a utilizar en el momento en que la producción de biogás sea la correcta, que significa que la materia orgánica está fermentando correctamente.

4.4 MANTENIMIENTO

Hay una serie de tareas que se deben llevar a cabo cada cierto tiempo para cerciorarse del correcto funcionamiento del digestor: [17]

1. Comprobar el nivel del agua de la válvula de alivio. Es importante que el nivel sea el correcto y establecido en el diseño, si en algún momento llegase a quedar sin agua, el biodigestor volvería a la etapa de puesta en marcha (entraría oxígeno directo al digestor que acabaría con las bacterias). Debe revisarse cada 3 meses, o siempre que haya condiciones temporales que puedan hacernos pensar que el nivel de agua ha cambiado.
2. Renovación del filtro de la trampa de ácido sulfhídrico. Como se ha explicado en el apartado 2.4.2.2., aparece un olor a podrido que nos indica que hay que cambiarla. Es importante hacerlo, ya que este ácido es tóxico.

3. Purga de agua condensada. Cuando el gas salga de forma no uniforme, es señal de que puede haber agua condensada en las tuberías. Se deben purgar abriendo las distintas tees a las que se conectan el reservorio, el filtro de ácido...
4. Revisar las inmedicaciones del digestor, comprobando que no haya ramas ni objetos que puedan dañarlo si hubiese una ráfaga de viento o algo similar.

4.5 REPARACIONES

En cuanto a reparaciones, solamente queda explicar las relativas a la propia bolsa del digestor. En caso de que cualquier otro elemento se estropee, simplemente se reemplazará.

El polietileno, como se ha comentado, es un material frágil, y es posible que se rasgue o rompa, apareciendo agujeros. Se distinguirán entre agujeros de menos de 10 cm, y agujeros más grandes. [6].

En caso de agujeros de menos de 10 cm, se reparan fácilmente con un adaptador de tanque (el mismo elemento con el que se sella el agujero del biogás). El único problema es colocarlo adecuadamente ya que en este caso el digestor va a estar lleno, y no se va a poder ir por dentro a poner la pieza. El procedimiento será el siguiente: se coloca el adaptador de tanque en una manguera, que se introducirá por una de las dos tuberías, la más cercana a la rotura, hasta el propio agujero. Mientras el que sostiene la manguera sujeta la pieza por dentro, desde fuera se cierra, colocando finalmente un tapón. De esta forma el agujero queda totalmente sellado.

Para agujeros de tamaños superiores a 10 centímetros es necesario poner un parche. Es recomendable hacer un parche a la “colombiana”, que se realiza de la siguiente forma:

En primer lugar hay que conseguir dos láminas rígidas, que tengan dimensiones superiores a la del agujero. Para cada lámina rígida, se cortan dos trozos de neumático de automóvil, algo más grandes que las láminas rígidas. Se ponen las 4 juntas, y se realizan agujeros por el perímetro de las láminas, a 2 centímetros del borde y dejando 3 centímetros entre cada agujero. A continuación se introduce dentro el biodigestor una lámina de caucho junto con

una lámina rígida, con tornillos en los agujeros apuntando hacia fuera, y situadas con el agujero en el centro. Por último, se atraviesa el plástico del digestor con los tornillos y se montan las dos láminas restantes, amarrándolas con tuercas.

Capítulo 5. CÁLCULOS Y RESULTADOS

En este apartado se van a realizar los cálculos necesarios para saber los componentes de la mezcla que supondrá la carga diaria, las dimensiones exactas del biodigestor y la zanja, y se analizarán dichos resultados.

5.1 CARGA DIARIA

La carga diaria propuesta en un primer momento son las excretas humanas de alrededor de 110 personas, ya que además de una fuente de energía y bioabono el biodigestor supondrá un sistema de saneamiento que de momento no existe en el lugar. La cantidad de excretas humanas, suponiendo que cada individuo genera 0.4 Kg al día, se calcula como:

$$\text{Excretas humanas} = n^{\circ} \text{ personas} * 0.4 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} = 110 * \frac{0.4\text{Kg}}{\text{día}} = 44 \frac{\text{Kg}}{\text{día}}$$

5.1.1 RELACIÓN C/N

Como se desarrolla en el apartado 3.1.1, la relación C/N debe estar entre unos márgenes. Prestando atención a la tabla 4: "Comparativa de las cantidades en % de C y N en distintos estiércoles", vemos como el % C de las excretas humanas es muy deficiente. Para incrementarlo y acercarnos al margen de relación óptimo, se valdrá de residuos bovinos. La relación que se busca será de 15:1, que aun fuera del margen óptimo (20 – 30), está a un nivel aceptable. Se calcula resolviendo la siguiente ecuación:

$$\text{Relación} \frac{C}{N} = \frac{\text{Kg residuo 1} * \text{concentración C} + \text{Kg residuo 2} * \text{concentración C}}{\text{Kg residuo 1} * \text{concentración N} + \text{Kg residuo 2} * \text{concentración N}}$$

$$\text{Relación} \frac{C}{N} = \frac{15 C}{1 N} = \frac{44 \text{ Kg} * 0.025 + \text{Kg bovinos} * 0.3}{44 \text{ Kg} * 0.0085 + \text{Kg bovinos} * 0.013}$$

$$\text{Kg bovinos} = 42,95 \text{ Kg/día}$$

Realizados los cálculos, se obtiene que para tener una relación mínima de 15 C:1 N, se necesitará mezclar la excreta de 110 personas con 43 Kg de estiércol bovino, para cada carga diaria. De esta forma el primer parámetro a controlar está en un rango adecuado y la digestión anaeróbica puede tener lugar.

5.1.2 CANTIDAD DE SÓLIDOS TOTALES

Como se desarrolla en el apartado 3.1.2, la cantidad de sólidos totales en la materia prima de un biodigestor no debe superar el 6%. Observando la tabla 5: “% de sólidos totales en distintos residuos”, obtenemos los valores de sólidos totales en residuos bovinos y humanos, que son de un 14 y 27 %.

Para obtener la cantidad de agua necesaria para rebajar los residuos totales al 6 % se resuelve la siguiente ecuación

$$\frac{Kg\ SS.TT.\ bovinos + Kg\ SS.TT\ humanos}{Kg\ totales\ humanos + Kg\ totales\ bovinos + Kg\ agua} = \% \ deseado$$
$$\frac{0.14 * 43 + 0.27 * 44}{44 + 43 + Kg\ agua} = 0.06$$

Resolviendo la ecuación se obtiene que es necesario añadir una cantidad de 211Kg de agua para 44 Kg de estiércol humano y 43 Kg de estiércol bovino.

5.2 DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR

5.2.1 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH)

Siguiendo las indicaciones del apartado 3.1.3, para una temperatura media de 20 °C, la existente en Zimbabue, el factor de corrección obtenido de la figura 14: “Gráfico para el cálculo del factor de corrección”, es 2. Y se utiliza de forma que el nuevo tiempo de retención será:

$$TR = Factor\ de\ corrección * tiempo\ de\ retención\ ideal = 2 * 20\ días = 40\ días$$

De esta forma, el tiempo de retención utilizado en este proyecto sería de 40 días y se estará trabajando en temperaturas entre 30 y 40 °C.

5.2.2 VOLUMEN DEL BIODIGESTOR

Siguiendo las ecuaciones del apartado 3.2.1, y una vez establecidos los parámetros anteriores, se calculará el volumen del digestor de forma sencilla:

En primer lugar, asumiendo la relación de: 1 Kg de residuos = 1 L de residuos, y conocida la carga diaria, se calcula el volumen de materia orgánica total en el digestor:

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

$$\text{carga diaria (L)} = 44 + 43 + 211 = 298$$

$$\text{Volumen mat. orgánica} = \text{carga diaria} * \text{tiempo de retención hidráulico}$$

$$\text{Vol. mat. orgánica} = 298 * 40 = 11920\text{L} = 11.920 \text{ m}^3$$

Conocido el volumen de materia orgánica y sabiendo que supone el 75 % del digestor, calculamos el volumen de biogás y por tanto el volumen total:

$$\text{Volumen biogás} = \text{Volumen mat. orgánica} / 3$$

$$\text{Volumen de biogás} = \frac{11.920}{3} = 3.9733 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen biodigestor} = \text{Volumen mat. orgánica} + \text{Volumen biogás}$$

$$\text{Volumen biodigestor} = 15.893 \text{ m}^3$$

5.2.3 DIMENSIONES DEL BIODIGESTOR

En el apartado 3.2.2 se establecen unas relaciones óptimas entre la longitud del digestor y su radio. A partir de dicha relación y conocido el volumen del biodigestor, se resuelve el siguiente sistema:

$$L = 7,5 * D = 15 * r$$

$$Volumen biodigestor = \pi * r^2 * L$$

$$L = 10.44 \text{ m}; r = 0.69 \text{ m}$$

5.3 GAS PRODUCIDO

Una vez conocida la carga diaria se puede calcular el gas diario producido como:

$$Volumen \text{ de gas (m}^3) = Kg \text{ estiércol bov.} * 0.04 + Kg \text{ excreta humana} * 0.06$$

$$Volumen \text{ de gas (m}^3) = 43 * 0,04 + 44 * 0.06 = 4.36 \text{ m}^3/\text{día}$$

5.4 DIMENSIONADO DE LA ZANJA

Siguiendo la tabla 9: "Valores para dimensionado óptimo de una zanja", justificada y explicada en el apartado 3.4.2.1., se calculan las dimensiones de la zanja:

α (°)	% V.L.	% V.B.	a (m)	b (m)	p (m)
15	76	24	$1.02 * r$	$1.82 * r$	$1.49 * r$
30	75	25	$0.72 * r$	$2.26 * r$	$1.33 * r$

Se van a desarrollar las dimensiones para un terreno arenoso y para uno arcilloso, y se escogerán in situ según las condiciones. En primer lugar el terreno arcilloso, de ángulo 15°.

$$a (m) = 1.02 * r$$

$$b (m) = 1.82 * r$$

$$p (m) = 1.49 * r$$

$$a(m) = 0,7 ; b(m) = 1,25 ; p(m) = 1,03$$

Y, para un terreno arenoso:

$$a(m) = 0.72 * r$$

$$b(m) = 2.26 * r$$

$$p(m) = 1.33 * r$$

$$a(m) = 0,5 ; b(m) = 1,56 ; p(m) = 0,92$$

Las dimensiones hacen referencia a la figura (19).

5.4.1 CÁLCULO DE LA LONA DEL BIODIGESTOR

Como se justifica en el apartado , conocida la altura (p) de la zanja y la longitud del digestor: (se calcula una longitud para cada valor p en función del terreno).

$$L_{lona} = L_{biodigestor} + p * \sqrt{2} + p$$

$$L_{lona}(m) = 10,44 + 1,03 * \sqrt{2} + 1,03 = 12,93 m$$

$$L_{lona}(m) = 10,44 + 0,92 * \sqrt{2} + 0,92 = 12,66 m$$

5.5 RESULTADOS

En este apartado se analizarán brevemente los resultados de producción de biogás.

Fijándonos en la tabla 8: “Consumo de biogás en m³/h en distintos utensilios” y conocida la producción diaria de biogás (4.36m³/día), se concluye que el biogás diario se consumirá casi por completo. Por ejemplo: utilizar un calefón de agua y calentar hornillos 3 horas para cocinar, ya consumiría 3.76 m³.

Por lo tanto, la producción de biogás será considerable y suficiente para cocinar y calentar agua, pero en un principio no se espera que haya grandes cantidades de sobra. Por ello,

únicamente se instalaran reservorios de gas para incrementar la presión del mismo, pero no para acumularlo, ya que no será necesario.

Capítulo 6. PLAN ECONÓMICO

En este último capítulo se presenta un plan económico que pretende hacer ver lo rentable que resulta debido al bajo coste y altas recompensas. Consta de dos partes: en primer lugar un presupuesto de coste y en segundo un plan de viabilidad económica.

6.1 PRESUPUESTO DE COSTE

El montaje de un biodigestor tubular, como se ha dicho anteriormente, no requiere de mano de obra cualificada. Por ello, los mismos usuarios del biodigestor podrían contribuir a montarlo, ahorrándose toda la mano de obra. En caso de no querer montarlo ellos mismos, habría que pagar:

1. La mano de obra para cavar la zanja.
2. La mano de obra para el montaje del biodigestor (que serían necesarias 2 ó 3 personas para tratar el plástico con cuidado)

La mano de obra para el cavado de la zanja equivaldría a entre dos y tres días de trabajo. En España, una hora de trabajo temporal son 7 €, mientras que un día de trabajo son 42,65 €. Sin embargo, en un poblado perdido de Zimbabue, saldría extremadamente barata, debido a su actual situación económica, siendo prácticamente gratis para una ONG de un país desarrollado.

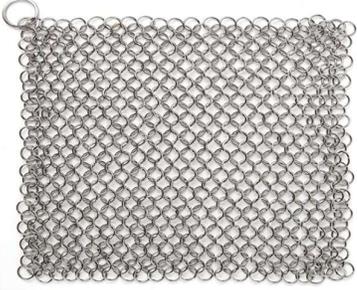
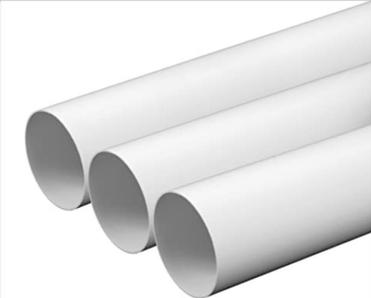
Por otra parte, el biodigestor se monta en un solo día y no es recomendable traer mano de obra ajena. Los propios usuarios son los que deberían aprender a gestionarlo, de forma que en el futuro, cuando el material falle y haya que cambiarlo, puedan ser ellos mismos los que lo hagan.

Por otra parte, resta financiar los materiales propios del sistema. Sumaremos los costes de la lista de materiales del apartado 3.6.1 en la siguiente tabla:

Tabla 10: Lista de materiales con costes unitarios

Lista de materiales	Imagen	Coste € (ud)
Cilindro hueco de polietileno (biodigestor)	17,45 €/m ² *45,26 m ² =789,81€	1579,62 (doble capa)
Tee (4 uds)		2 - 4
Adaptador de tanque (2 uds)		1,5

<p>Válvula de alivio</p>		<p>1</p>
<p>Trampa de agua</p>		<p>2</p>
<p>Filtro de ácido sulfhídrico:</p> <p>1. 2 uniones 2. Malla</p>		<p>1. 30 2. 15</p>

		
Tuberías PVC (2 uds)		30
Liga de neumático		Se puede conseguir tubos usados de llantas de camión, o tubos nuevos de vehículo liviano.
Llaves de paso (4 uds)		25

<p>Tuberías de unión (30 m)</p>		<p>20</p>
<p>Lona cualquier material</p>	<p>-</p>	<p>En el propio lugar se adapta alguna lona o manta libre.</p>
<p>Pala y azada</p>		<p>10 y 31</p>
<p>COSTE FINAL</p>		<p>1835,48</p>

Al margen de los distintos costes que pueden tener los materiales según el país, financiar este proyecto sale por alrededor de 1800-1900 €. En el caso de que se pidiese mano de obra externa, sería algo más caro, sobre todo en países desarrollados, como sería España, agregando 120 € por la mano de obra de tres días. En caso de Zimbabue quedaría alrededor del mismo precio ya que la mano de obra es muy barata.

6.2 PLAN DE VIABILIDAD

Previo a la realización del trabajo, todos los participantes en Proyecto Zimbabwe realizaron una actividad de recaudación de fondos para financiar todos los proyectos. Para algunos de los proyectos la recaudación es sumamente exigente, sin embargo, como se ha visto, para este proyecto se requiere una inversión mínima. Los materiales son relativamente asequibles, la mano de obra no es especializada por lo que no supondrá una inversión más, y el trabajo de cavado de la zanja lo ayudarían a ejecutar los que después utilizarían el biodigestor (los propios habitantes de Mount Darwin).

Por lo tanto, la financiación de este proyecto no resulta ningún problema con los fondos que se obtuvieron en el período de recaudación.

Una vez en funcionamiento, los usuarios deberán hacerse cargo de su mantenimiento. En un principio, no debería ser necesario ningún mantenimiento que requiriese una inversión. Y, de ser así, sería únicamente un mínimo gasto en reparar alguna brecha.

Pasados tres o cuatro años, habría que volver a montar el biodigestor, ya que el material del reactor se estropea en ese período. Sin embargo, el resto del sistema se puede reutilizar, por lo que únicamente habría que invertir cada tres o cuatro años el valor del cilindro de polietileno, que resulta una inversión considerable.

El precio del reactor puede aparentar demasiado, sin embargo, multiplicamos los años de vida de digestor, por la generación de gas diaria (apartado 5.3) y por el coste de 1 m³ de gas natural en España obtenemos:

$$\text{Energía obtenida (€)} = 3 \text{ años} * 365 \text{ día} * 4,36 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 0,71955 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} = 3400 \text{ €}$$

Este valor sería el coste total de la energía producida. Si le restamos el coste total del biodigestor obtenemos el ahorro energético:

$$\text{Ahorro} = 3400 - 1835,48 = 1564,52 \text{ €}$$

Por tanto, además de servir como sistema de saneamiento, proporciona una energía limpia inaccesible de otra manera (evidentemente no hay gas natural en estas zonas) y ahorrando mucho en costes.

Capítulo 7. CONCLUSIONES

Por último, en este apartado se pretende analizar y justificar los beneficios tanto de salud como económicos y de desarrollo que trae consigo este proyecto en función a los datos obtenidos anteriormente.

1. En primer lugar otorga un sistema de saneamiento limpio que, en la actualidad, no existe. Es el primer beneficio y lo que se busca desde un primer momento.
2. También acarrea un beneficio al desarrollo. La instalación de un biodigestor otorga energía limpia y propia, guiando a la comunidad a la autosuficiencia. Aunque no aporte energía a toda la comunidad, se pretende enseñar a los nativos a construir estos biodigestores, de forma que ellos mismos puedan reutilizar la tecnología y construir más biodigestores proporcionando más energía y bioabono a la comunidad.
3. Beneficio económico. Esta energía resulta barata, como se demuestra en el apartado inmediatamente anterior. La inversión es mucho menor que la recompensa que trae en valor energético.

Si se presta atención a los principales objetivos que se buscaban en el comienzo del proyecto, se observa que con el diseño desarrollado se cumplen todos y cada uno de ellos.

Los biodigestores resultan muy apropiados para países en desarrollo. Aportan una energía que no se puede conseguir de otra forma y un sistema de saneamiento que en estos países resulta inexistente, sin tener un coste muy grande.

La instalación del mismo en la comunidad de Mount Darwin hubiese traído consigo muchos beneficios que no hubiesen pasado desapercibidos. Se espera poder poner en práctica este trabajo en verano de 2021, cuando pase la crisis sanitaria, y comprobar la eficacia y valor real de estos sistemas.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rudas Gómez, C. (2002). *Conflicto en Zimbabue*.
- [2] Parellada, G. (2020). Muere Robert Mugabe, el hombre que liberó y condenó Zimbabue. Retrieved 14 August 2020, from https://elpais.com/internacional/2019/09/06/actualidad/1567746933_151750.html
- [3] El espectro de la hiperinflación vuelve a sobrevolar Zimbabue. (2020). Retrieved 14 August 2020, from <https://www.oroym Finanzas.com/2017/10/espectro-la-hiperinflacion-vuelve-sobrevolar-zimbabue/>
- [4] perfil, V. (2020). Captación y aprovechamiento de biogas, biodigestor. Retrieved 14 August 2020, from <http://p-rosso.blogspot.com/2011/07/captacion-y-aprovechamiento-de-biogas.html>
- [5] Biodigestor: qué es y cómo hacer uno casero | Fundación Aquae. (2020). Retrieved 14 August 2020, from <https://www.fundacionaquae.org/biodigestor/>
- [6] Martí Herrero J. 2019. Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación. Redbiolac. Ecuador. ISBN: 978-9942-36-276-6
- [7] Biodigestor. (2020). Retrieved 14 August 2020, from <https://es.wikipedia.org/wiki/Biodigestor>
- [8] OLAYA, Y.; (2006). Diseño de un biodigestor de cúpula fija. Trabajo de Grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira.
- [9] Varnero Moreno, M. (2011). *Manual de Biogás*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- [10] Daniela Bernal Vélez, Daniela Quintero Garzón, (2016) *Desarrollo de una propuesta para la mejora de un modelo de biodigestor anaerobio convencional a escala banco a partir de una mezcla de residuos bovinos y lodos en la finca el recodo de Tabio, Cundinamarca*. Fundación Universidad De América Facultad De Ingenierías Departamento De Ingeniería Química Bogotá, D. C.
- [11] Yeison Olaya Arboleda, (2009). *Fundamentos para el diseño de biodigestores, Palmira*. Facultad de ingeniería y administración, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira
- [12] Marquez Kacic, C., & Quispe Curasi, J. (2005). *Estudio del tratamiento de lodos provenientes de pisciculturas mediante un sistema de digestión anaerobio*. Temuco (Chile): Universidad Católica de Temuco.
- [13] S. G. Pavlostathis & E. Giraldo-Gomez (1991) Kinetics of anaerobic treatment: A critical review, *Critical Reviews in Environmental Control*

- [14] GUZMÁN S., J.C.; (2008). *Apuntes sobre consumo energético de biomasa*. Diplomado en Energía SNAP, Proyecto No. 003/2008, PROLEÑA Soluciones Energéticas Eficientes, La Paz, Bolivia, febrero.
- [15] Iván Corona Zúñiga, (2007). *Biodigestores*. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- [16] BOTERO, R; PRESTON, T. R. *Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización*. Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV). Cali, Colombia. 1987.
- [17] Astrid Forget. (2011). Manual de diseño y de difusión de biodigestores familiares, con enfoque en biodigestores tubulares. Lima
- [18] Valvula de seguridad... (2020). Retrieved 14 August 2020, from <https://n1p1s2r2.wordpress.com/2009/09/15/valvula-de-seguridad/>
- [19] D Poggio, I Ferrer, LI Batet y E Velo, *Adaptación de biodigestores tubulares de plástico a climas fríos*. Research Group on Development Cooperation and Human Development (Grupo de Investigación en Cooperación y Desarrollo Humano - GRECDH), Technical University of Catalonia (Universitat Politècnica de Catalunya - UPC), Barcelona, Spain
- [20] Biogas for a better life: An African initiative - Renewable Energy World. (2020). Retrieved 14 August 2020, from <https://www.renewableenergyworld.com/2007/07/01/biogas-for-a-better-life-an-african-initiative-51480/#gref>
- [21] Qichun, Hu. The promotion of rural domestic biogas plants in P. R. China. Chengdu : Biogas Institute of Ministry of Agriculture (BIOMA), 2005
- [22] Biogas China. (2020). Retrieved 14 August 2020, from <http://www.isis.org.uk/BiogasChina.php>
- [23] (2020). Retrieved 14 August 2020, from https://www.ctc-n.org/system/files/dossier/3b/del_1.2_biodigestores_latinoamerica.pdf
- [24] Varnero, M.T. y Arellano, J. 1990. Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. Ministerio de Agricultura (FIA). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Informe Técnico. Santiago, Chile
- [25] Moncayo Romero, G. (2008). *Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*. [S.l.]: Gabriel Moncayo Romero.
- [26] Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, T., Kohli, S., & Rana, V. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. *Bioresource Technology*, 95(1), 1-10. doi: 10.1016/j.biortech.2004.02.010
- [27] VARGAS L., L.; (1992). Los biodigestores, alternativa de tratamiento para residuos pecuarios. Tesis (Ingeniero Sanitario). Universidad del Valle, Santiago de Cali.

- [28] (2020). Retrieved 14 August 2020, from https://www.globalmethane.org/documents/events_ag_20070514_moreno_biogas_and_fertilizer%20in_chilel.pdf
- [29] Martí-Herrero, J., & Cipriano, J. (2012). Design methodology for low cost tubular digesters. *Bioresource Technology*, 108, 21-27. doi: 10.1016/j.biortech.2011.12.117