



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Diseño de un sistema de saneamiento para aguas fecales para la ciudad de Arusha, Tanzania

Documento:

Memoria

Autor/Autora:

Marc Farrús Tena

Director/Directora - Codirector/Codirectora:

Maria Gonçalves Ageitos

Titulación:

Grado en Tecnologías Industriales

Convocatoria:

Otoño

TRABAJO DE FIN DE ESTUDIOS



Resumen

En este trabajo se expone el proceso de diseño de ingeniería básica para el diseño de un sistema de saneamiento autónomo para aguas fecales humanas, sin conexión a alcantarillado ni ningún tipo de suministro. El saneamiento tiene como objetivo final poder producir recursos para los usuarios como agua potable y fertilizante.

Es un proyecto con una finalidad social, basándose en el criterio principal que debe ser fácilmente implementable, con materiales y productos que sean de fácil acceso.

A lo largo de esta memoria se presentan los antecedentes sobre saneamiento autónomo que existen actualmente, los requerimientos que deben tener los recursos que se obtienen finalmente. En la etapa de diseño toda la argumentación de los procesos y tecnologías seleccionados para cada etapa. Finalmente incluye un análisis del impacto ambiental, el impacto en la comunidad de la región, su viabilidad y ventaja económica respecto el saneamiento convencional.

Abstract

In this project it is presented the process of the basic engineering design of an autonomous sanitation system for faecal waters without sewer connection and any type of supply. The sanitation final object is to produce resources for the users like drinking water and fertilizer.

This project is made with social purpose and it is based whit the main view that must be easy to develop and build with materials and products that are easy access.

Throughout this memory it is presented the background of autonomous sanitation that exists, the requirements that must be met the resources obtained after the sanitation process. In the part of the design all the arguments of the process and technologies selected for each stage. Finally, it includes an environmental impact analysis, the impact in the community of the region, its economic viability and vantages respect the conventional sanitation.

Índex

RESUMEN	I
ABSTRACT	I
ÍNDEX	II
ÍNDICE DE TABLAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	V
LISTADO DE ABREVIATURAS/GLOSARIO	VII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETO	1
1.2 ALCANCE	1
1.3 REQUERIMIENTOS	2
1.3.1 Especificaciones generales.....	2
1.3.2 Especificaciones normativas	2
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	2
2 ANTECEDENTES Y REVISIÓN DEL ESTADO DEL SANEAMIENTO.....	6
2.1 MÉTODOS DE DEPURACIÓN ACTUALES	6
2.1.1 Letrinas de cámara simple	7
2.1.2 Letrina de cámara simple mejorada ventilada	8
2.1.3 Fosa alterna	9
2.1.4 Cámara de deshidratación.....	11
2.1.5 Cámara de compostaje	12
2.1.6 Fosa Séptica	13
2.1.7 Reactor anaerobio con deflectores	14
2.1.8 Reactor anaerobio de flujo ascendente	14
2.2 MÉTODOS DE DEPURACIÓN INNOVADORES	15
2.2.1 Descomposición de las heces humanas con reactor electroquímico	15
2.2.2 Letrinas compactas con reutilización de agua	16
2.2.3 Técnicas de separación de líquidos y sólidos de las heces para su aprovechamiento.....	17
2.2.4 Técnicas de producción de biocarbón	18
3 CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS Y RESIDUOS	20
3.1 COMPOSICIÓN DE LAS HECES HUMANAS.....	20
3.1.1 Caracterización química de las heces y orina humana	20
3.1.2 Producción de materia fecal de las personas.....	21
3.1.3 Coprología de las heces humanas.....	21
3.1.4 Maneras de eliminar los patógenos	23
3.2 REQUERIMIENTOS LEGALES DEL AGUA POTABLE.....	23
3.2.1 Composición química del agua	24
3.2.2 Depósito y redes de distribución	25
3.3 REQUERIMIENTOS LEGALES DEL ABONO ORGÁNICO	25
3.3.1 Clasificación de los nutrientes.....	25
3.3.2 Clasificación de los fertilizantes	26
3.3.3 Características químicas del abono orgánico de origen animal	27
4 FUENTES DE ENERGÍA APLICABLES AL DISEÑO	28
4.1 ENERGÍA SOLAR	28
4.2 ENERGÍA EÓLICA	29
4.3 BIOGÁS	29
4.4 BIOMASA	29
4.5 ANÁLISIS DE LAS FUENTES DE ENERGÍA APLICABLES AL DISEÑO.....	30



5	CONTEXTO DE LA POBLACIÓN Y UBICACIÓN	31
5.1	CLIMATOLOGÍA DE LA CIUDAD	31
5.2	CONTEXTO DE LA POBLACIÓN.....	32
6	DISEÑO DEL SANEAMIENTO	33
6.1	DETERMINACIÓN DEL PROCESO A SEGUIR	33
6.1.1	<i>Selección de alternativas para el diseño.....</i>	<i>34</i>
6.1.1.1	Selección del proceso principal para las heces entre combustión o compostaje	34
6.1.1.2	Selección entre reducción de volumen por degradación anaeróbica o no.....	35
6.1.1.3	Selección del proceso de secado	36
6.1.1.4	Selección del combustor	39
6.1.1.5	Selección del proceso de depuración	39
6.1.1.6	Selección del proceso de desinfección	43
6.1.2	<i>Esquema del diseño seleccionado.....</i>	<i>44</i>
6.2	BALANCE DE MASAS DEL SISTEMA	44
6.3	DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA	47
6.3.1	<i>Dimensionamiento del reactor anaerobio</i>	<i>48</i>
6.3.2	<i>Dimensionamiento del secador</i>	<i>48</i>
6.3.3	<i>Dimensionamiento del secador</i>	<i>49</i>
6.3.4	<i>Dimensionamiento del filtrado</i>	<i>53</i>
6.3.5	<i>Dimensionamiento del depósito de potabilización</i>	<i>56</i>
6.4	DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA ENERGÉTICO	57
6.4.1	<i>Demanda de energía externa del sistema</i>	<i>57</i>
6.4.2	<i>Demanda de energía por ciclo</i>	<i>58</i>
6.4.3	<i>Selección de la fuente de energía renovable.....</i>	<i>58</i>
6.4.4	<i>Almacenamiento de energía.....</i>	<i>59</i>
6.4.5	<i>Dimensionamiento básico del sistema fotovoltaico.....</i>	<i>59</i>
6.4.6	<i>Protecciones del sistema eléctrico</i>	<i>60</i>
7	ANÁLISIS FINANCIERO	62
7.1	ELABORACIÓN DEL PRESUPUESTO	62
7.2	DEFINICIÓN DE PRECIO	62
7.2.1	<i>Vida útil del diseño.....</i>	<i>62</i>
7.2.2	<i>Definición del precio para los usuarios</i>	<i>63</i>
7.3	USO FINAL DE LOS RECURSOS PRODUCIDOS.....	63
7.3.1	<i>Uso final del agua potable.....</i>	<i>63</i>
7.3.2	<i>Uso final de las cenizas</i>	<i>63</i>
7.4	BENEFICIO FRENTE AL SANEAMIENTO CONVENCIONAL.....	64
8	ANÁLISIS DE SEGURIDAD	66
9	CONCLUSIONES	67
10	REFERENCIAS.....	68

Índice de tablas

TABLA 1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LAS HECES HUMANAS EXPRESANDO LA CONCENTRACIÓN DE LOS COMPONENTES EN PORCENTAJE MÁSCO. VÍA: WWW.EAUTRICE.ORG.....	20
TABLA 2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LA ORINA HUMANA EXPRESANDO LA CONCENTRACIÓN DE LOS COMPONENTES EN PORCENTAJE MÁSCO. VÍA: WWW.EAUTRICE.ORG.....	21
TABLA 3. CARACTERIZACIÓN PATOGENICA DE LAS HECES HUMANAS. VÍA: ONU, 2020.....	21
TABLA 4. PARÁMETROS DE CONTROL BIOLÓGICO DEL AGUA POTABLE. VÍA: MINISTERIO DE DERECHOS SOCIALES Y AGENDA 2030, 2003.....	24
TABLA 5. PARÁMETROS DE CONTROL QUÍMICO DEL AGUA POTABLE. VÍA: MINISTERIO DE DERECHOS SOCIALES Y AGENDA 2030, 2003.....	24
TABLA 6. ELEMENTOS QUÍMICOS SEGÚN SU CLASIFICACIÓN NUTRICIONAL. VÍA:UNIÓN EUROPEA, 2003.....	26
TABLA 7. CLASIFICACIÓN DE ABONOS SEGÚN SU CONTENIDO. VÍA:MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, 2003.....	26
TABLA 8. CLASIFICACIÓN DE ABONOS SEGÚN SU PROCEDENCIA. VÍA:MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, 2003.....	26
TABLA 9. PROPIEDADES DEL ABONO ORGÁNICO DE ORIGEN ANIMAL. VÍA:MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, 2003.....	27
TABLA 10. COMPARATIVA DE PUNTOS CLAVE DE LAS TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE APLICABLES AL DISEÑO DEL PROYECTO. VÍA: PROPIA.....	30
TABLA 11. RESUMEN MENSUAL DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA CIUDAD DE ARUSHA DE 2019. VÍA: WWW.WEATHERBASE.COM.....	32
TABLA 12. RESUMEN DE LAS EVALUACIONES DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO. VÍA: PROPIA.....	34
TABLA 13. RESUMEN DE LAS PUNTUACIONES DADAS POR CADA CRITERIO Y SU VTP OBTENIDO. VÍA: PROPIA.....	36
TABLA 14. CARACTERÍSTICAS DE LAS PROPIEDADES DE LAS UNIDADES DE FILTRADO. VÍA: UNIVERSIDAD DE PERÚ, 2011.....	40
TABLA 15. CARACTERÍSTICAS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL FILTRADO. VÍA: UNIVERSIDAD DE PERÚ, 2011.....	41
TABLA 16. CARACTERÍSTICAS TIPOS DE PARRILLAS EN COMBUSTORES DE LECHO FIJO. VÍA: BARRERA, J. ET AL., 2018.....	50
TABLA 17. CARACTERÍSTICAS DE LA COMBUSTIÓN EN FUNCIÓN DE SU APORTACIÓN DE AIRE EXTERNO. VÍA: BARRERA, J. ET AL., 2018.....	52
TABLA 18. CONCENTRACIONES EN MASA DE LOS NUTRIENTES CONTENIDOS EN LA CENIZA. VÍA: SOLLA-GULLÓN ET AL., 2005.....	64

Índice de figuras

FIGURA 1. ESQUEMA DEL PROCESO DE DEPURACIÓN CONVENCIONAL DE AGUAS RESIDUALES EN SU PASO POR LOS DISTINTOS DISPOSITIVOS Y ETAPAS. DESDE SU GENERACIÓN HASTA SU DEVOLUCIÓN EN LA NATURALEZA. VÍA: WWW.INWRDAM.COM	3
FIGURA 2. LETRINAS DE HOYO SECO Y GESTIÓN DE SU RESIDUO. VÍA: COMPENDIO DE SISTEMAS DE SANEAMIENTO Y SUS TECNOLOGÍAS, TILEY. E.....	3
FIGURA 3: ESQUEMA DEL SISTEMA DE LETRINAS ABONERAS. VÍA: COMPENDIO DE SISTEMAS DE SANEAMIENTO Y SUS TECNOLOGÍAS, TILEY. E.....	4
FIGURA 4: ESQUEMA DE LA CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SANEAMIENTO SEGÚN SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS. VÍA: PROPIA.....	6
FIGURA 5: DIBUJO REPRESENTATIVO DE UNA LETRINA DE CÁMARA SIMPLE. VÍA: UNIVERSIDAD DE LOUGBOROUGH.....	8
FIGURA 6: DIBUJO REPRESENTATIVO DE UNA LETRINA DE CÁMARA SIMPLE. VÍA: UNEP, 2020...	9
FIGURA 7: DIBUJO REPRESENTATIVO DE A FOSA ALTERNA. VÍA: UNIVERSIDAD DE LOUGBOROUGH.....	10
FIGURA 8: DIBUJO REPRESENTATIVO DE LA CÁMARA DESHIDRATACIÓN. VÍA: UNIVERSIDAD DE LOUGBOROUGH.....	11
FIGURA 9: DIBUJO REPRESENTATIVO DE LA CÁMARA DE COMPOSTAJE. VÍA: TILEY. E, 2008.....	12
FIGURA 10: DIBUJO REPRESENTATIVO DE UNA FOSA SÉPTICA. VÍA: WWW.IAGUA.ES	13
FIGURA 11: DIBUJO REPRESENTATIVO DE REACTOR ANAEROBIO CON LECHO FILTRANTE. VÍA: TILEY. E, 2008.....	14
FIGURA 12: ESQUEMA DE PRINCIPIO DEL PROCESO DE SANEAMIENTO POR REACTOR ELECTROQUÍMICO. VÍA: ENVIRON. SCI.: WATER RES. TECHNOL., 2018, 4, 1439.....	15
FIGURA 13: ESQUEMA DE LA REACCIÓN REDOX QUE SE PRODUCE EN EL REACTOR ELECTROQUÍMICO. VÍA: ENVIRON. SCI.: WATER RES. TECHNOL., 2018, 4, 1439.....	16
FIGURA 14: DISEÑO EN 3D DEL RETRETE DISEÑADO POR EWAG. VÍA: EAWAG (SWITZERLAND), 2013.....	17
FIGURA 15: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL REACTOR DE BIOCARBÓN. VÍA: UNIVERSIDAD DE STANFORD, 2012.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED. 8
FIGURA 16: MAPA CON LA UBICACIÓN DE LA CIUDAD DE ARUSHA EN TANZANIA, MARCADA CON UN PIN ROJO. VÍA: GOOGLE MAPS.....	3ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURA 17: DIAGRAMA DE PROCESO DEL SANEAMIENTO AUTÓNOMO. VÍA: PROPIA.....	33
FIGURA 18: ILUSTRACIÓN DE ESQUEMA DE CONCEPTO DE LA COMBINACIÓN DE TECNOLOGÍAS. VÍA: PROPIA.....	37
FIGURA 19: ILUSTRACIÓN DE ESQUEMA DE CONCEPTO DE LA COMBINACIÓN DE TECNOLOGÍAS. VÍA: PROPIA.....	38
FIGURA 20: ESQUEMA DE PROCESO PARA FILTRACIÓN DE LIXIVIADOS. VÍA: WWW.TELWESA.COM	42
FIGURA 21: ESQUEMA DE PROCESO DEL DISEÑO SELECCIONADO. VÍA: PROPIA.....	44
FIGURA 22: BALANCE DE MASAS DEL CHOQUE TÉRMICO. VÍA: PROPIA.....	45
FIGURA 23: BALANCE DE MASAS DEL SECADOR. VÍA: PROPIA.....	45
FIGURA 24: BALANCE DE MASAS DEL COMBUSTOR. VÍA: PROPIA.....	46
FIGURA 25: BALANCE DE MASAS DEL FILTRADO. VÍA: PROPIA.....	46
FIGURA 26: BALANCE DE MASAS DEL CONDENSADOR. VÍA: PROPIA.....	46
FIGURA 27: BALANCE DE MASAS DEL CHOQUE TÉRMICO. VÍA: PROPIA.....	47
FIGURA 28: ESQUEMA BÁSICO DE COMBUSTOR DE LECHO FIJO. VÍA: VAN-LOO (2008).....	49
FIGURA 29: ESQUEMA DE COMBUSTOR DE LECHO FIJO CON PARRILLAS HORIZONTALES Y FLUJO ASCENDENTE. VÍA: CARRASCO-VENEGAS (2013).....	51
FIGURA 30: ESQUEMA DE COMBUSTOR DE LECHO FIJO CON PARRILLAS HORIZONTALES Y FLUJO ASCENDENTE. VÍA: CARRASCO-VENEGAS (2013).....	52
FIGURA 31: GRÁFICO DE LA IRRADIACIÓN SOLAR EN FUNCIÓN DE LAS HORAS DEL DÍA. VÍA: BERNARDOS ET AL (2015).....	53

FIGURA 32: GRÁFICA DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN FUNCIÓN DE LA CONEXIÓN Y CAUDAL. VÍA:
WWW.LAMA.ES55

Listado de abreviaturas/Glosario

ABREVIATURAS:

AVAD: Años de Vida Ajustados por Discapacidad.

ACS: Agua Caliente Sanitaria.

CIA: “*Central Intelligence Agency*” – Agencia Central de Inteligencia.

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno.

DQO: Demanda Química de Oxígeno.

Dn: Diámetro Nominal.

EDAR: Estación de Depuración de Aguas Residuales.

HHV: “*Higher Heating Value*” - Poder Calorífico Máximo.

Hv: Entalpía de vaporización.

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

m: masa.

NO_x: Óxidos de Nitrógeno.

ONU: Organización de las Naciones Unidas.

PVC: Cloruro de Polivinilo.

P_{atm}: Presión Atmosférica.

P_{cámara}: Presión de la Cámara.

PIB: Producto Interior Bruto.

Q: Calor.

RAE: Real Academia Española.

RD: Real Decreto.

UFC: Unidades Formadoras de Colonias.

UV-C: Radiación Ultravioleta.

UNESCO: “*United Nations Educational, Scientific, and Cultural*” - Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

WWC: “*World Water Council*” - Consejo Mundial del Agua.

UNIDADES:

°C: Grados Centígrados

W: Watío.

kW: kilowatio.

Wh: Watío-hora.

kWh: kilowatio-hora

Kg: Kilogramo.

µg: microgramo.

μm : micrómetro.

mm: milímetro.

Cm: centímetro.

m: metro.

m^2 : metro cuadrado.

L: Litro

Hrs/h: horas.

min.: Minutos

J: Julio.

kJ: kilojulio.

Cp: Calor específico.

min.: Minutos

ΔT : Variación de temperatura.

Wp: Watios de pico.

V: Volteo.

A: Amperio.

VA: Voltamperio.

€: Euro.

\$: Dollar.

COMPUESTOS QUÍMICOS:

Bi_2O_3 : Trióxido de Bismuto.

CaO: Óxido de calcio.

CO_2 : Dióxido de Carbono.

ClO: Óxido de cloro.

K_2O : Óxido dipotásico.

P_2O_2 : Dióxido de fosforo.

TiO_2 : Dióxido de Titanio.

1. Introducció

1.1 Objeto

El presente estudio tiene como objetivo principal el diseño de un sistema para retretes comunitarios para el saneamiento de aguas fecales sin alimentación de fuentes de agua externa ni posibilidad de conexión a una red de saneamiento. Así como la producción de energía eléctrica para su propio uso y ciclos de depuración, que permita obtener como productos finales agua potable, abono orgánico y energía eléctrica. El objetivo es dotar de una solución alternativa a los complejos sistemas de desagües fecales y plantas depuradoras en países en vías de desarrollo, reduciendo así el vertido de aguas fecales en ríos, canales y lagos reduciendo así la transmisión de enfermedades víricas y bacterianas.

1.2 Alcance

El alcance de este proyecto es realizar la ingeniería básica para desarrollar un sistema de saneamiento de aguas fecales que no se pueda conectar a ninguna red de evacuación, de alimentación eléctrica ni de conexión de agua sanitaria. El único aporte que puede tener de energía tiene que provenir del tratamiento de las heces humanas y de fuentes de energías renovables que puedan incorporar en la construcción del sistema.

Dentro de este proyecto se pretende presentar un diseño inicial de la solución desde un punto de vista técnico detallando los elementos, equipos y componentes necesarios detallando sus parámetros fundamentalmente necesarios, así como la explicación del funcionamiento de la instalación. También se incluye una propuesta de diseño en planta de la implementación de todo el conjunto íntegro para su fabricación y principio de desarrollo en detalle.

El proyecto incluirá:

- Diagrama de proceso e instrumentación de principio de todo el proceso. Incluyendo la explicación y características técnicas de todos los componentes necesarios para el funcionamiento del diseño.
- Esquemas unifilares de la parte eléctrica. Incluyendo la explicación de su funcionamiento y las características técnicas de los componentes necesarios.
- Análisis ambiental, aspectos de seguridad y viabilidad económica del mismo.

Quedará excluido del proyecto:

- Un diseño de los retretes a emplear.
- La definición del proceso de construcción y/o fabricación del conjunto.
- La definición del plan para transportar e instalar el producto final.
- El impacto en la eficiencia del sistema de la introducción de aguas grises.
- Posibles mezclas y usos del abono orgánico de procedencia humana con otros productos químicos y/o vegetales.
- El efecto en los cultivos del abono orgánico que se produzca.

1.3 Requerimientos

1.3.1 Especificaciones generales

- La solución propuesta no puede disponer de conexión a ninguna red de alcantarillado.
- La solución propuesta no puede disponer de alimentación de suministro eléctrico, de agua ni gas.
- La solución propuesta debe dar como productos finales agua potable, abono orgánico y energía eléctrica necesaria para los futuros ciclos de depuración.

1.3.2 Especificaciones normativas

- La calidad del agua depurada debe cumplir los parámetros de calidad especificados en el Anexo I del Real Decreto 140/2003.
- El producto final que se obtenga como abono debe cumplir los parámetros de calidad especificados en el Número 1 del Grupo 2.1 del Anexo I del Real Decreto 506/2013.

1.4 Justificación

La razón del desarrollo de este proyecto es buscar una solución alternativa a los sistemas de saneamiento de agua convencionales para países en vías de desarrollo, donde en la mayoría de los pueblos y ciudades no hay redes de conexión para evacuación de aguas fecales, así como muy pocos centros de tratamiento de las mismas.

Actualmente, el continente África no es la zona del mundo con menor acceso al agua potable. Según Naciones Unidas, a nivel global más de 2.100 millones de personas (un 27% de la población mundial) carecen de acceso de agua potable a través de una cañería en sus hogares y 4.500 millones (un 58% de la población mundial) de personas carecen de saneamiento gestionado de forma segura. Recayendo más de la mitad de la mitad de esta población en el África subsahariana. (UNESCO & Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos, 2019).

Actualmente, como principales sistemas de saneamiento existen dos métodos:

- Retretes Sanitarios Convencionales: es el sistema más utilizado a nivel mundial y el que se usan todos los días en el continente europeo y en los países desarrollados. Existe un retrete donde las personas defecan, este al tirar de la cadena se llena de nuevo de agua limpia y las heces son evacuadas por un complejo sistema de cañerías que recoge además muchos otros tipos de aguas residuales y son transportados hasta una planta de tratamiento de aguas residuales para limpiarla hasta una calidad que pueda ser devuelta a los ríos y acuíferos sin ser dañina para el medio ambiente y las personas. El proceso de saneamiento sería similar al de la figura 1.

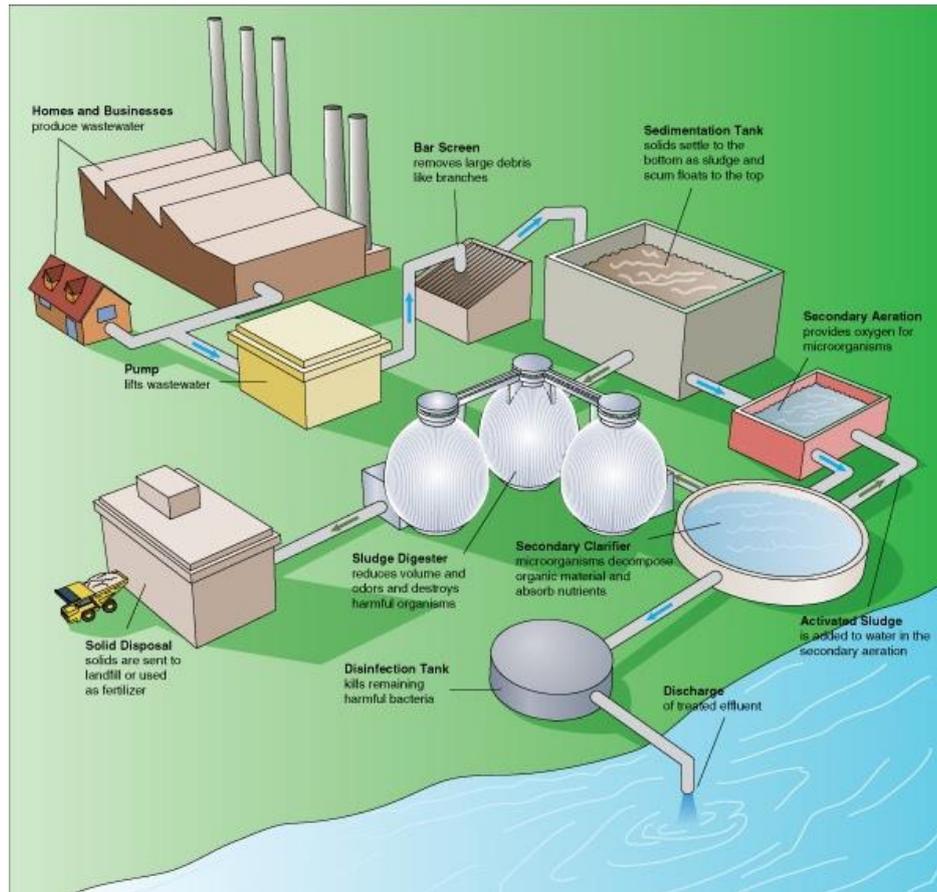


Figura 1. Esquema del proceso de depuración convencional de aguas residuales en su paso por los distintos dispositivos y etapas. Desde su generación hasta su devolución en la naturaleza. Vía: www.inwrdam.com

- Letrinas: las letrinas suelen ser un espacio fuera de la vivienda, que no suelen estar conectadas a ninguna red de alcantarillado, que suelen estar conectadas a un hoyo, cubo, deposito o similar, pero no a una red de alcantarillado. Consisten básicamente en un espacio cerrado que tiene un agujero cónico en el centro que conectadas a lo que tengan debajo. Que después las aguas negras deben recogerse, gestionándose de forma segura, para ser llevadas a un punto de tratamiento donde se depuren. Actualmente de las letrinas se distinguen varios tipos:
 - I. Letrinas de hoyo seco: las más sencillas y comunes, consiste en la letrina conectada a un hoyo cavado en el suelo. Una vez este se llena todas las heces y residuos se cargan y se llevan a un punto de tratamiento. Suelen tener variantes como las de doble pozo o separadores de orina para usar el lodo el mismo usuario.

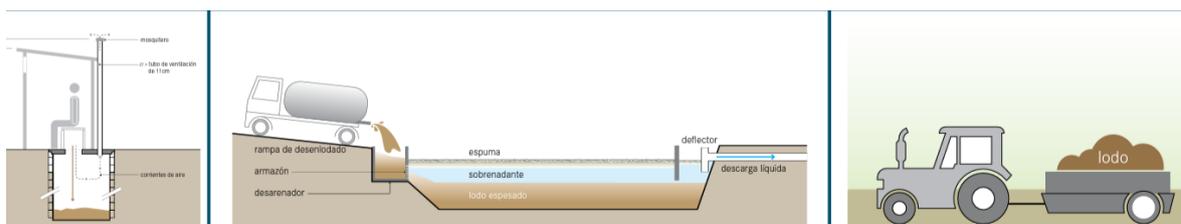


Figura 2. Letrinas de hoyo seco y gestión de su residuo. Vía: Compendio de sistemas de Saneamiento y sus tecnologías, Tiley. E.

- II. Letrinas aboneras: son letrinas con dos cámaras o pozos independientes aisladas del terreno, en estas los usuarios una vez llena añaden cal, cenizas y papel. Después de dejar guardar durante 6 meses aproximadamente y se obtiene un abono totalmente seco y sin olores.

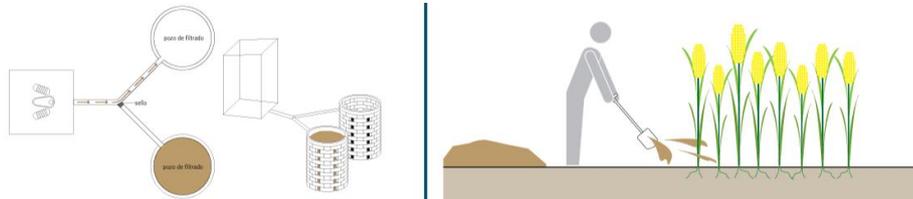


Figura 1: Esquema del sistema de letrinas aboneras. Vía: Compendio de sistemas de Saneamiento y sus tecnologías, Tiley. E

- III. Letrinas de secado: son muy similares a las letrinas aboneras pero elevadas del suelo y en este caso solo cuentan con una cámara que queda fuera y se seca por solar o se hierva en un depósito cerámico. Se evapora todo el residuo líquido obteniendo abono seco como producto del anterior método.
- Defecación al aire libre: consiste en defecar públicamente al aire libre por la falta de acceso a una red de saneamiento o disponibilidad de letrinas. Dejando las heces sin sanear en muchas ocasiones que se acaban vertiendo en ríos y acuíferos.

En África Subsahariana se estima que en 2015 el acceso promedio a los servicios básicos de saneamiento era tan solo del 28%. Las personas que carecían de un servicio de saneamiento básico tenían acceso a instalaciones de saneamiento limitadas (instalaciones mejoradas compartidas por dos o más hogares – 18%), usaban instalaciones no mejoradas, como letrinas de pozo sin losa o plataforma, letrinas colgantes o letrinas de cubo (31%), o practicaban la defecación al aire libre (23%). Solo tres países del África subsahariana tenían datos para estimar el acceso al saneamiento gestionado de forma segura: Senegal (24%), Somalia (14%) y Níger (9%). (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO, 2019).

Aun así el gobierno de Tanzania estima que en su país hay actualmente más de un tercio de hogares sin disponibilidad de letrinas y la gran mayoría que sí tienen sin unos estándares mínimos de higiene y gestión de los residuos. (Universidad Politécnica de Madrid, 2016)

Estas aguas residuales que se vierten sin ningún tipo de saneamiento son desembocadas en ríos y lagos de donde la población recoge agua para beber transmitiendo distintos tipos de enfermedades, ya que las heces contienen muchos tipos de rotavirus, bacterias shigella y gusanos parasitarios que son los principales causantes de enfermedades que provocan diarrea, la segunda causa de muerte en países en vías de desarrollo según la ONU. Siendo esta, según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de 2020, la causa de casi dos millones de muertes prevenibles en todo el mundo casi cada año, así como 123 millones años de vida ajustados en función de la discapacidad (AVAD)⁸ que pudieron haber sido evitados, y la mayor carga recae sobre los niños menores de cinco años. Llegando a ser usada para riego con una superficie estimada de 36 millones de hectáreas. (UNESCO & Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos, 2020).

La necesidad de este proyecto nace para poder encontrar una solución alternativa a los sistemas convencionales que la WWC estima que requeriría una inversión de más de 650.000 millones de dólares para poder implementar una seguridad universal del agua, que no llegaría a garantizar una red de saneamiento para cada hogar.

Para ello este proyecto pretende garantizar una solución alternativa a este problema que redujera considerablemente los costes de inversión, siendo más fácil de implementación y que genere un mayor aprovechamiento de los residuos y optimización de los recursos.

Esta solución además para su fácil implementación y mantenimiento en Tanzania deben de buscarse el máximo número de componentes y materiales posibles que sean de fácil acceso en el país. Siendo integradora e inclusiva con la comunidad local, que pueda respetar sus costumbres y sea accesible para ellos, además de que el sistema sea accesible e intentar ser lo más sencillo posible para que pueda ser mantenido por la comunidad local.

2 Antecedentes y revisión del estado del saneamiento

Para poder definir el proceso de saneamiento del diseño de este proyecto se estudiarán y se evaluarán los sistemas de saneamiento autónomos que existen actualmente. Estudiando los más convencionales, que muchos no llegan a realizar un saneamiento total, y los más innovadores que se han desarrollada en los últimos años.

2.1 Métodos de depuración actuales

Actualmente existen distintos métodos de depuración para aguas negras y las mismas junto con otros tipos de aguas residuales. Los sistemas que existen se pueden clasificar según el caudal de aguas residuales que se quieren tratar, su disponibilidad de una red de alcantarillado, uso de energía, uso de agentes externos...

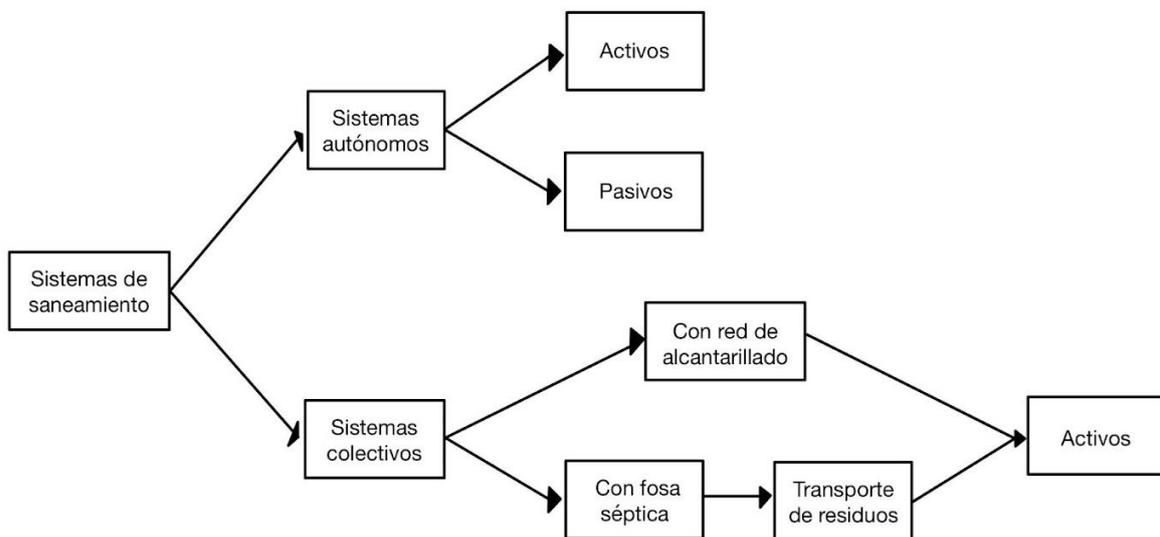


Figura 4: Esquema de la clasificación de los sistemas de saneamiento según sus principales características. Vía: propia.

Según el esquema de la figura 2.1 los sistemas de saneamiento se clasifican de la siguiente manera:

- **Sistemas de saneamiento autónomos:** son aquellos en los que el saneamiento se produce en el punto de generación de las aguas negras. No se conectan mediante una red de alcantarillado o transporte con otros puntos de generación. Estos pueden ser:
 - **Activos:** Requieren de un consumo de energía o de uso de agentes externos, cómo agua o químicos, para poder realizar el saneamiento de las aguas residuales que estén tratando.
 - **Pasivos:** No requieren de una fuente de energía o de uso de agentes externos para realizar el saneamiento de las aguas residuales que estén tratando.
- **Sistemas de saneamiento colectivos:** son aquellos en que hay un solo punto de saneamiento para varios puntos de generación de aguas residuales.

- Con alcantarillado: son un conjunto de tuberías generalmente subterráneas en las cuales las aguas residuales son transportadas ya sea por gravedad y/o por bombeo desde su punto de generación hasta el punto de tratamiento.
- Con fosa séptica: es el sistema usado cuando no se dispone de red de alcantarillado. Es un sistema para un punto o varios muy cercanos de generación de aguas residuales. Consiste en una cámara hecha de concreto, fibras de vidrio, PVC o plástico, a través de la cual pueden fluir aguas negras y grises para un tratamiento primario. Por sedimentación y una reacción anaeróbica los sólidos orgánicos son reducidos. Una vez lleno el tanque el agua es recogida por un camión cisterna con una bomba de aspiración y se transporta hasta el punto de tratamiento.

En estos sistemas el punto de saneamiento suele ser una EDAR (Estación de Depuración de aguas residuales). Estos son sistemas para grandes caudales, cómo pueblos y ciudades, que son sistemas activos, ya que requieren de un gran consumo de energía y productos para acelerar o producir reacciones químicas para el saneamiento.

En los siguientes apartados veremos los diferentes tipos de sistemas de saneamiento autónomos tanto activos como pasivos.

2.1.1 Letrinas de cámara simple

Es el método más simple de saneamiento básico y una de las tecnologías más usadas. Se conforma de una cámara simple enterrada bajo el nivel del suelo y unos 2 metros sobre el nivel freático, para evitar la contaminación de los acuíferos. La cámara es revestida por su superficie lateral de ladrillo, hormigón o mortero revocado directamente al suelo. El fondo de la cámara no se debe revestir para permitir que el líquido se filtre desde la cámara a la tierra no saturada que tiene debajo (Universidad de Loughborough, 2012).

La cámara evita saturarse por la degradación de las heces y compuestos orgánicos y por la lixiviación de las heces que posteriormente se filtra al subsuelo. Los patógenos son llevados con este líquido y quedan absorbidos por la superficie del subsuelo, quedando eliminados allí.

Una vez lleno se deja reposar permitiendo la máxima infiltración que el suelo permite. Después el producto final que se obtiene es el lodo. Una vez lleno se puede cubrir de tierra y dejarse enterrado o debe vaciarse y llevarse el lodo a un punto de tratamiento secundario adecuado.

Es un sistema muy sencillo de construir y operar, que permite ser construido y operado con un bajo coste y con materiales locales. En contrapartida tiene un bajo confort por los malos olores tanto como la atracción de moscas y otros insectos. Hay baja reducción de patógenos también dependiendo del terreno pueden contaminar acuíferos. Y tiene un alto costo humano y capital el vaciado y tratamiento del lodo (Tiley, E, 2011).

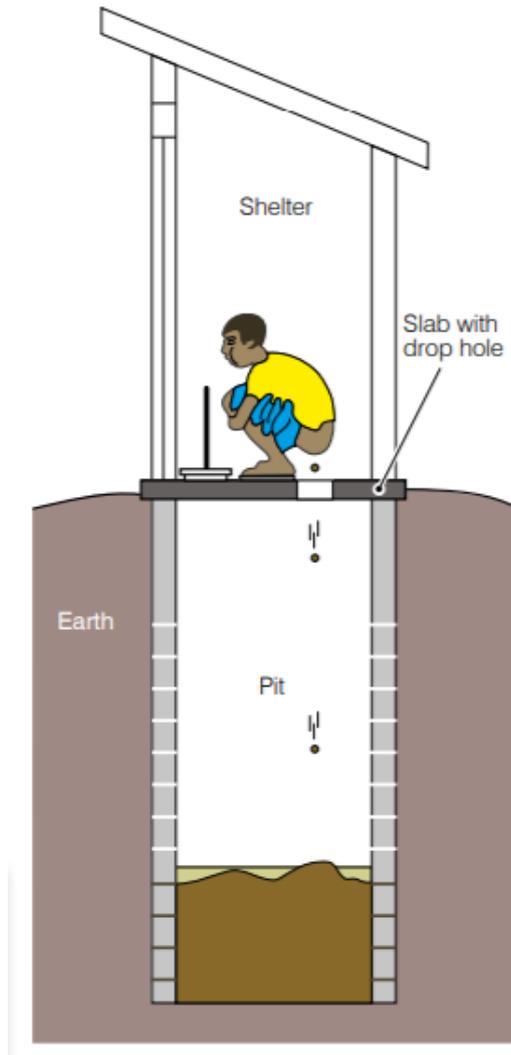


Figura 5: Dibujo representativo de una letrina de cámara simple. Vía: Universidad de Loughborough.

2.1.2 Letrina de cámara simple mejorada ventilada

Este sistema es el mismo que el anterior, pero añadiendo una mejora de ventilación en la cámara. Se conforma de una cámara simple igual que la del sistema anterior, pero se añade un tubo en el punto más alto de la estructura con una rejilla en la parte superior del tubo. El tubo tiene un diámetro de $100 < D_n < 300 \text{ mm}$. Y la altura de este debe quedar por encima del techo de la caseta que contiene la letrina (Tiley, E, 2011).

El aire pasa por el agujero de la letrina hasta el exterior del tubo, este crea una presión de succión dentro de sí mismo e induce la circulación de aire dentro de la cámara, debido a la diferencia de temperatura de aire, más frío dentro la cámara y más caliente el de ventilación que hace que la corriente sea ascendente.

El proceso de saneamiento que se produce y el producto final que se obtiene es el mismo que con la cámara simple. Pero la mejora que se obtiene es que debido a la ventilación que se incorpora se reducen mucho los malos olores, así como la presencia de moscas y otros insectos que puedan ser atraídos dentro de la cámara.

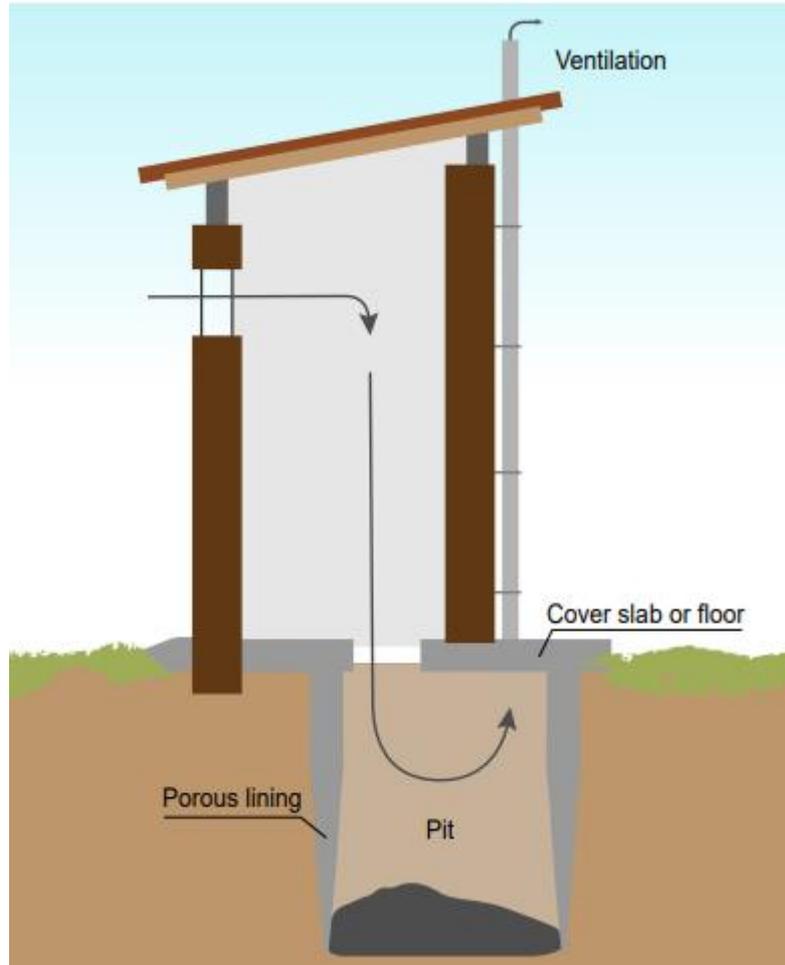


Figura 6: Dibujo representativo de una letrina de cámara simple. Vía: UNEP, 2020.

De este sistema existen dos variantes:

- Con cámara doble: permite alternar el sistema cuando una cámara se llena. Se puede seguir usando la otra cámara mientras la primera reposa, drena, se reduce en volumen, se degrada y es vaciada. Debe dejarse reposar al menos un año, después el fango que se obtenga estará parcialmente desinfectado.
- Con separador de orina: en este sistema hay dos depósitos, uno para las heces y otro para la orina. La orina puede retirarse del tanque aparte y ser utilizada como fertilizante. Este sistema tiene la ventaja que reduce la lixiviación y permite a las heces secarse y degradarse más rápidamente, además de prolongar el tiempo de vida útil de la cámara al reducirse el volumen de vertido.

2.1.3 Fosa alterna

La fosa alterna es una tecnología muy similar a las cámaras dobles ventiladas, pero están solamente pensadas para almacenar y hacer un tratamiento parcial, en cambio, las fosas alternas para generar un producto similar a la tierra, que puede usarse como fertilizante orgánico para el suelo de cultivo.

La construcción de la fosa alterna es la misma que la de una cámara doble ventilada, pero difiere de esta en su operación y mantenimiento. Tiene dos puntos distintos en su construcción. El primero es que la cámara y la caseta que cubre la letrina deben ser estancos, ya que no puede entrar agua en el interior de la cámara. Y el segundo, es que,

en la pared inferior de la cámara, que es la que tiene contacto con el subsuelo, debe agregarse una capa de hojas en el fondo.

A lo largo de la vida útil de esta cámara las heces se deben de ir cubriendo con capas de hoja, cenizas y/o tierra después de la defecación, no así la orina. Estos añadidos introducen organismos como lombrices, bacterias y hongos que favorecen el proceso de degradación, haciendo el material más rico en carbono y más reactivo para su degradación, además aumenta el espacio entre poros que favorecen las condiciones aeróbicas de degradación permitiendo un pH más básico en la mezcla. Además, cubrir las heces ayuda a reducir la presencia de moscas y otros insectos (Tiley. E, 2011).

Una vez la primera cámara se llena se cambia el uso a la segunda cámara. La primera se debe cubrir bien para que no entre agua, que estimula el crecimiento de patógenos, además de bajar la porosidad e impedir la degradación aeróbica por parte de las bacterias. Cuando se deja reposar durante un año se obtiene un producto similar a la tierra, rico en nutrientes con un nivel de desinfección elevado.

Es un sistema muy sencillo de construcción, fácil operación y mantenimiento, barato y que se puede construir y usar con materiales locales. El nivel de desinfección de patógenos es muy bueno, pero aun así no da una garantía total de desinfección. Es un buen sistema sobre todo para áreas rurales, pero queda muy a responsabilidad del usuario las posibilidades que tiene el producto final, además de requerir una fuente orgánica constante para cubrir las heces.

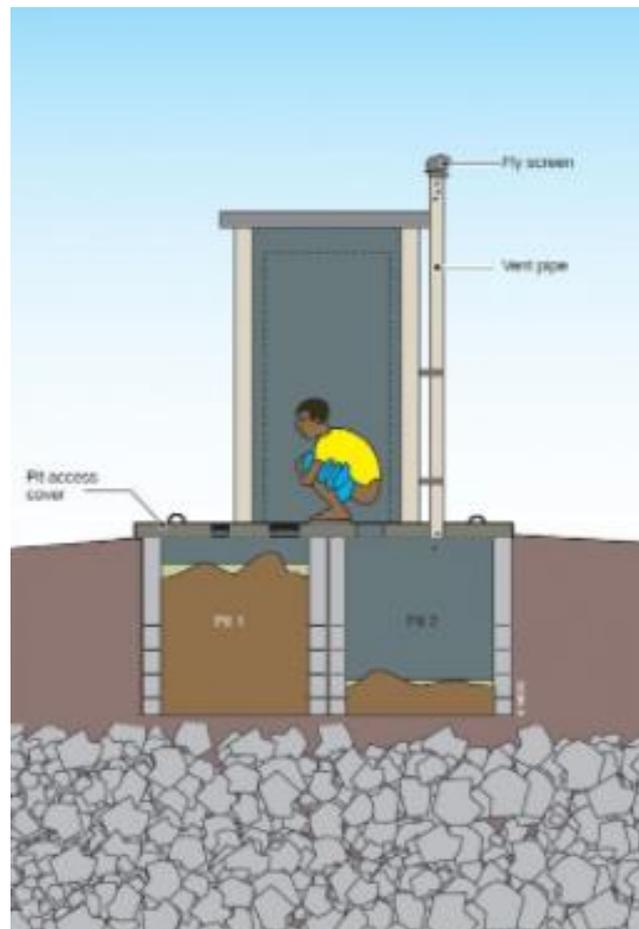


Figura 7: Dibujo representativo de a fosa alterna. Vía: Universidad de Loughborough

2.1.4 Cámara de deshidratación

La cámara de deshidratación es un sistema muy similar a la cámara simple ventilada, pero está pensado para secar las heces, para así poder reducir el volumen de estas y poder hacer las cámaras más pequeñas.

La cámara debe de construirse con hormigón, ladrillo sellado o algún material estanco incluyendo su pared inferior. Además, la letrina tiene que incluir un separador de orina, ya que en esta tecnología las heces no pueden mezclarse. Se debe dimensionar correctamente el tubo para tener una ventilación capaz de retirar toda la humedad de la cámara. Estas cámaras se suelen construir por encima del nivel del suelo.

Las heces si no se mezclan con agua u orina y están en un habitáculo seco tienden a secar de forma muy rápida. Esto hace que se emanen malos olores, no atraigas moscas y otros insectos y que en ausencia de agua y humedad los patógenos no puedan desarrollarse y sean eliminados obteniendo un buen nivel de desinfección. Para favorecer el secado se puede añadir tierra o cenizas después de la defecación.

Una vez llena la cámara se debe de tapar y dejar secar y reposar durante un año obteniendo así finalmente heces secas, que son seguras para el manejo de los usuarios y se pueden emplear como fertilizantes.

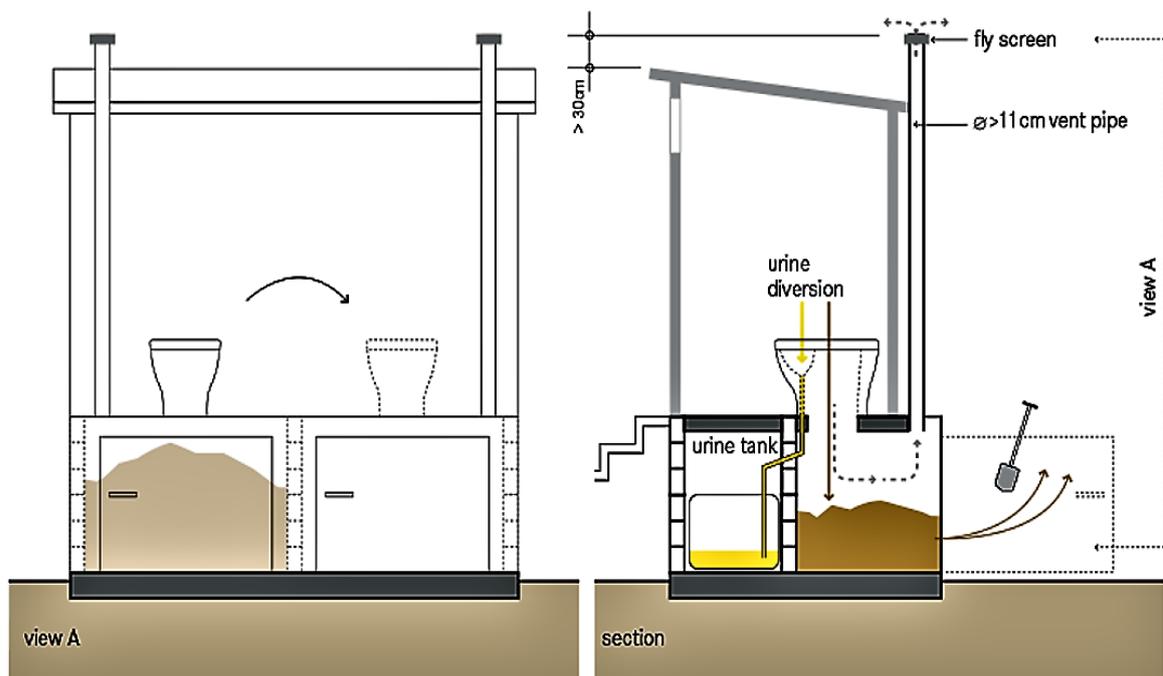


Figura 8: Dibujo representativo de la cámara deshidratación. Vía: Universidad de Loughborough

Este método presenta mejoras significativas en cuanto a uso de espacio, sobre todo para áreas urbanas y un buen nivel de desinfección. Pero, aún depende mucho de la formación y mantenimiento de los usuarios para su correcto funcionamiento. Necesita de una fuente de cobertura continuamente, no garantiza una total desinfección y sigue necesitando interacción de los usuarios con las heces para su vaciado (Tiley. E, 2008).

2.1.5 Cámara de compostaje

Esta es una tecnología ya más avanzada que las anteriores, y si se diseña y opera correctamente se puede obtener un saneamiento total. El equipo consta de:

1. Una cámara llamada reactor, sirve para almacenar las heces y es donde se produce la degradación.
2. Un sistema de ventilación, tanto de extracción como de aportación de aire.
3. Un sistema de drenaje, situado en la parte inferior, que sea capaz de retirar los sistemas de líquidos.
4. Una puerta de acceso en la parte inferior para poder retirar la composta.

En el interior de la cámara se produce un proceso de compostaje. El compostaje es el tratamiento o estabilización de materia orgánica por un proceso microbiológico complejo de degradación aeróbica en unas condiciones de humedad y temperatura controladas que se obtiene un producto como abono o sustrato (Fundación Tierra, 2003). Las heces son acumuladas dentro de la cámara, y se deben mezclar con relleno como madera, ceniza u hojas secas. Una vez allí se produce esta reacción de compostaje. Para que se produzca debe de haber una buena aireación para tener presencia de oxígeno, el sistema de ventilación ha de poder evacuar correctamente el CO₂ y el vapor de agua que se genera dentro de la cámara y aportar el suficiente oxígeno por la aportación de aire. La humedad debe rondar entre un 40-70%, para ello es importante que la ventilación esté correctamente dimensionada y que el drenaje pueda evacuar correctamente los líquidos que se producen de la lixiviación de las heces. La temperatura interna del reactor ha de rondar en torno los 40-50°C. Y la relación C:N ha de ser de 25:1 que se obtiene con la aportación del material de relleno.

La cámara el primer año no se debe manejar el producto salvo para remover la composta para favorecer su aireación. Una vez pasado este tiempo, se debe ir retirando el compost periódicamente para su uso como abono o fertilizante. La composta si el proceso se ha hecho correctamente es totalmente segura, aunque se recomienda el uso de protección para su manipulación.

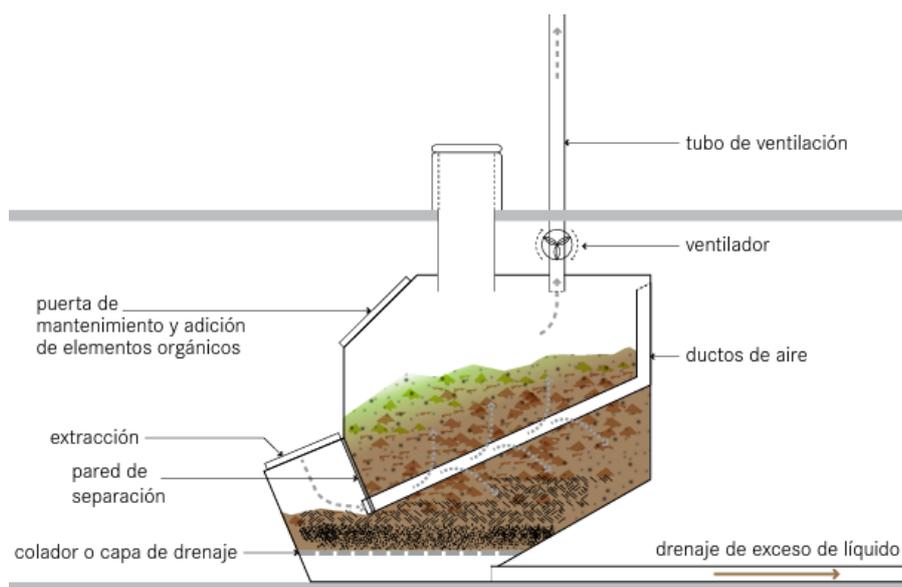


Figura 9: Dibujo representativo de la cámara de compostaje. Vía: Tiley. E, 2008

Este es un sistema ya más avanzado que los anteriores, se obtiene un alto nivel de desinfección de patógenos, no hay riesgo de contaminación de acuíferos, no hay problemas de moscas, así como malos olores y tiene un tiempo de vida útil mucho más prolongado. Por contraparte, se requiere de un mantenimiento continuo y por usuarios capacitados, requiere un continuo control del proceso y debido a que la humedad puede echar a perder el proceso es mejor usar una letrina con separador de orina. Además de que si no se realiza en las condiciones óptimas el compostaje puede requerir un tratamiento secundario para la desinfección de la composta (Tiley. E, 2008).

2.1.6 Fosa Séptica

Este sistema consiste en un tanque de almacenamiento y pretratamiento de aguas negras. Esta tecnología consta de una cámara estanca construida bajo suelo generalmente. La fosa está compartimentada en diferentes cámaras internas, separadas por deflectores que evitan que pase la espuma. En la última cámara se encuentra un tubo de descarga con forma de T. La cámara debe tener puntos de acceso para mantenimiento y limpieza, además de una buena ventilación para eliminar los gases tóxicos que emanan de ella (Tiley. E, 2008).

Las aguas negras fluyen a través de la fosa, las partículas pesadas se asientan en el fondo de la cámara. Estas se asientan y se descomponen en un 50% por un proceso anaeróbico. Obteniendo finalmente un agua negra, pero libre de sólidos, espuma en la superficie y lodo en la parte inferior que se tienen que ir retirando periódicamente (Metcalf&Eddy, 1996).

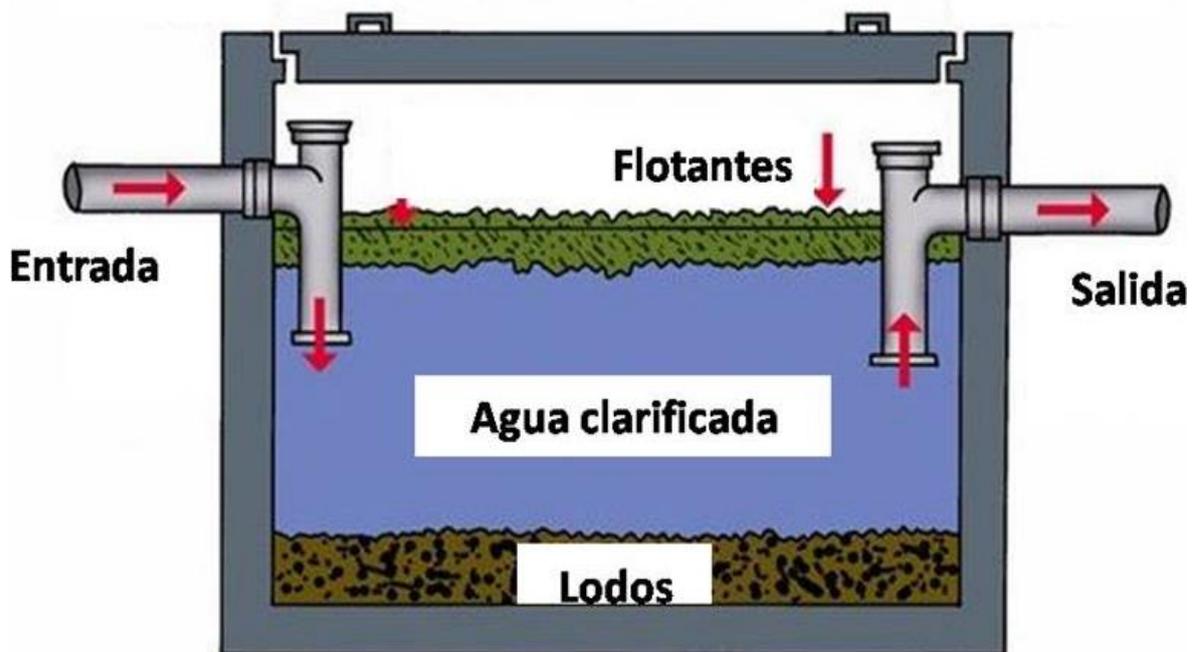


Figura 10: Dibujo representativo de una fosa séptica. Vía: www.iagua.es

Esta tecnología es barata y sencilla de construir, tiene una larga vida útil y consigue un agua negra libre de sólidos. Pero solo sirve como almacenamiento y pretratamiento, hay una muy baja desinfección de patógenos tiene que ser vaciada y limpiada periódicamente siendo un proceso peligroso por el contacto de patógenos y los gases tóxicos que produce.

2.1.7 Reactor anaerobio con deflectores

Este sistema es una mejora de la fosa séptica. Este sistema tiene un mayor número de cámaras y deflectores por los que tiene que pasar el agua aumentando el contacto con el lodo activo que mejora el tratamiento y reduce la demanda biológica de oxígeno en un 90% (Tiley. E, 2008).

Este sistema presenta una mejora significativa en la limpieza que se obtiene del agua y es sencillo de construcción y operación. Además, se reduce mucho la acumulación de lodo y el que se produce está estabilizado. Pero aun así se obtiene un nivel muy bajo de reducción de patógenos y tanto el lodo como el agua deben vaciarse de la cámara para obtener un tratamiento posterior.

2.1.8 Reactor anaerobio de flujo ascendente

Esta tecnología ya es significativamente más avanzada que las vistas anteriormente. Consiste en el mismo proceso que un reactor anaeróbico con deflectores, pero en este se incorporan unos filtros. Estos filtros operan con el flujo ascendente del agua que entra por los deflectores en la parte inferior de cada cámara. El filtro debe quedar cubierto totalmente en cada cámara para que el flujo sea uniforme. Los filtros deben tener una superficie amplia para que se desarrollen las bacterias en él, así como una porosidad suficiente para no obturarse, esta puede reducirse a medida que se va avanzando de cámara. Estos filtros pueden estar hechos de grava, roca, granza de plástico...

Con este sistema se consigue que a medida que las partículas son atrapadas, la materia orgánica se degrada por el lodo activo que hay en el filtro, reduciendo de esta manera la demanda biológica de energía y eliminando al 80% los sólidos en suspensión, pudiendo obtener un agua muy limpia (Tiley. E, 2008).

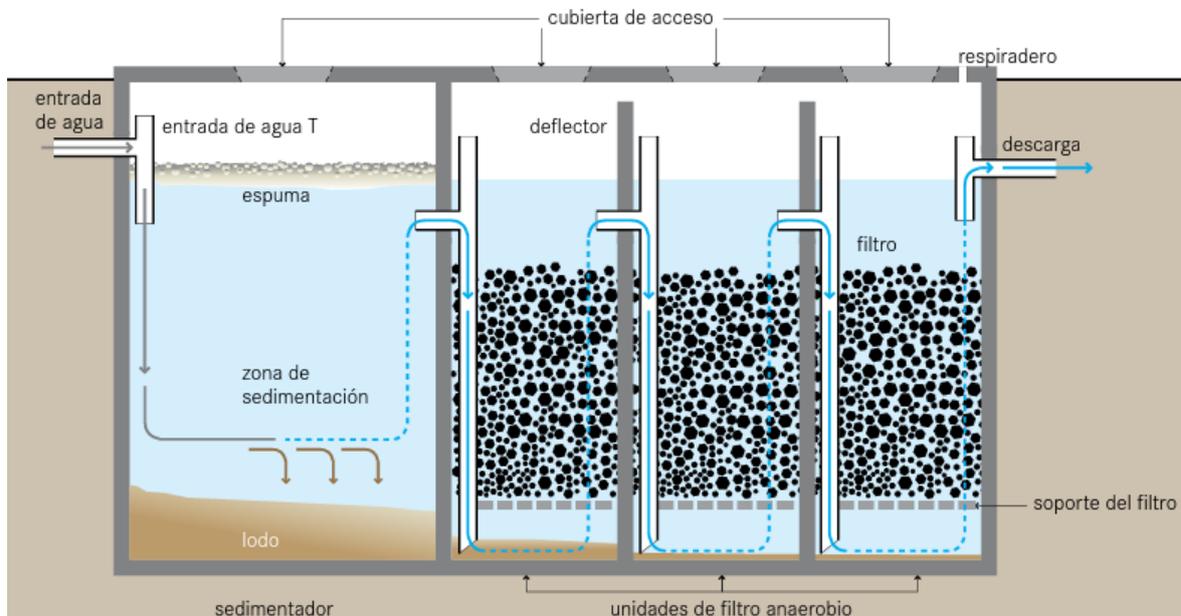


Figura 11: Dibujo representativo de reactor anaerobio con lecho filtrante. Vía: Tiley. E, 2008

Este sistema permite hacerse en muchos tamaños y caudales, consiguiendo un agua muy limpia de sólidos en suspensión. Es fácil y sencillo de construcción, además de muy versátil ya que los filtros se pueden hacer de muchos materiales según la disposición local. Pero

aún sigue dando una baja reducción de patógenos y el agua y fangos que se obtienen siguen requiriendo de un tratamiento secundario.

2.2 Métodos de depuración innovadores

Después de los métodos convencionales de saneamiento autónomo que podemos encontrar sistemas más innovadores, que algunos aún se encuentran en fase de desarrollo como pueden ser los proyectos presentados en el concurso “Reinventando el Retrete” organizado por la Fundación Gates durante los años 2011, 2012 y 2013 o el que han propuesto algunas “Start-Ups”.

2.2.1 Descomposición de las heces humanas con reactor electroquímico

Consiste en un modelo de inodoros autocontenidos. Dentro del contenedor se encuentran los retretes y todo el equipamiento necesario para hacer el saneamiento.

Este sistema consta de 4 partes en las que se produce el saneamiento. El diagrama de proceso podría ser el siguiente:

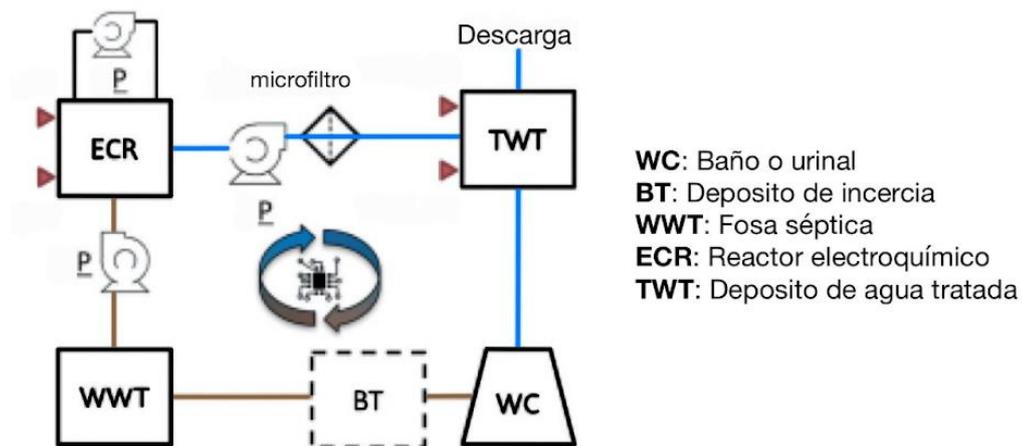


Figura 12: Esquema de principio del proceso de saneamiento por reactor electroquímico. Vía: *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 2018, 4, 1439

1. Fosa séptica: las heces se acumulan después de su generación en un tanque de 2m³ de polipropileno. Dentro de él el proceso que se produce es igual al detallado en el punto 2.1.6. En esta etapa se reducen los sólidos en suspensión a un tamaño mínimo de 3mm y el lodo que se sedimenta en el tanque.
2. Reactor electroquímico: una vez el residuo de la fosa séptica se macera y reposa, es bombeado hasta el reactor electroquímico. Dentro de él se encuentra un reactor electroquímico con un ánodo (se compone de 8 barras semiconductoras de $[(Bi_2O_3)_z(TiO_2)_{1-z}]$) y un cátodo (compuesto por ocho barras de acero inoxidable serie 316) en el que se produce una reacción “Redox”. Es un tipo de reacción en el que el reductor suministra electrones de su estructura al medio y el oxidante que capta estos electrones. La reacción para sanear el agua que se produce es la siguiente: $HOCl \rightleftharpoons H^+ + ClO^-$, $pK_a = 7.53$ aplicando un potencial de eléctrico de entre 3,3 y 3,5V.

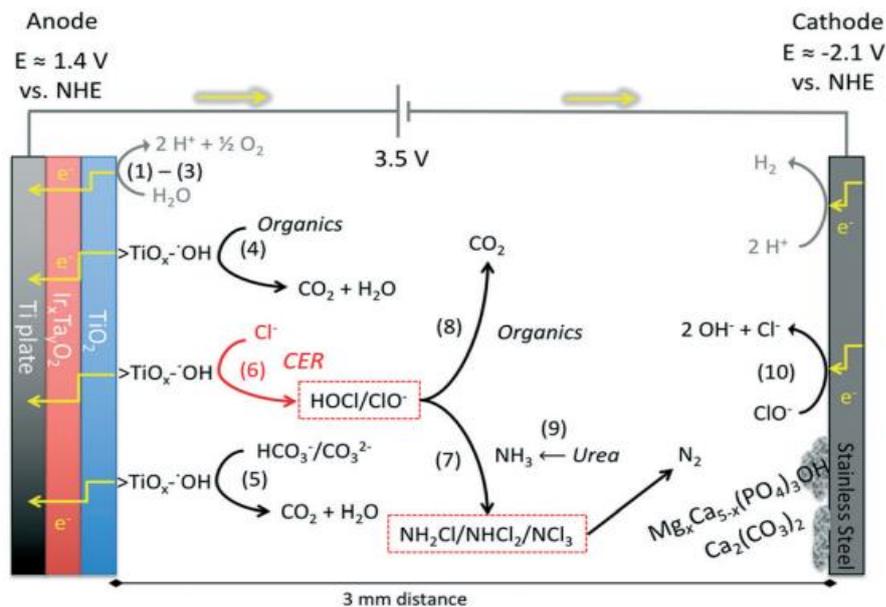


Figura 13: Esquema de la reacción redox que se produce en el reactor electroquímico. *Vía: Environ. Sci.: Water Res. Technol., 2018, 4, 1439.*

Con esta reacción se consiguen degradar los orgánicos en agua y CO₂. De la Urea y los agentes libres aportados por el cátodo se consigue descomponer los óxidos de cloro que se transforman en Cloro reducido que garantiza una producción constante y es lo que produce la desinfección total de las aguas residuales. Después de un período prolongado de operación del sistema con aguas residuales el cloro se estabilizó en NaCl 20 mM en agua se estabilizó a un nivel casi constante (Water Res. Technol., 2018, 4, 143) y puede ser apta para filtraje y consumo humano.

3. Microfiltro: una vez se obtiene el agua desinfectada y libre de agentes orgánicos, el agua se pasa por un filtro de malla de 200µm para eliminar el agua de sólidos en suspensión que puedan quedar y pasa a la siguiente etapa.
4. Depósito de agua tratada: el agua se almacena en un tanque estanco, para poder ser reutilizada para la cisterna o para consumo humano.

2.2.2 Letrinas compactas con reutilización de agua

Este sistema crea un sistema de retrete compacto. Este retrete contiene un núcleo central que contiene dos depósitos, uno estanco para acumular la orina y el otro con aireación para las heces. Los usuarios se encargan de rotar la bandeja según tengan que defecar u orinar.

El equipo que es como un mueble transportable contiene un tanque de agua limpia que sirve para poder usarse para la descarga limpiando la bandeja de defecación de la letrina, una manguera para la limpieza anal o menstrual y una pica higiénica para el lavado de manos.

El agua utilizada para la descarga y la limpieza de manos pasa por un equipo es filtrada por gravedad por una unidad de ultrafiltración desarrollada por Peter Varbatens en 2009 para la recuperación de agua contaminada de ríos. Esta después es bombeada manualmente por los usuarios para reconducirse al tanque de agua tratada y ser reusada.

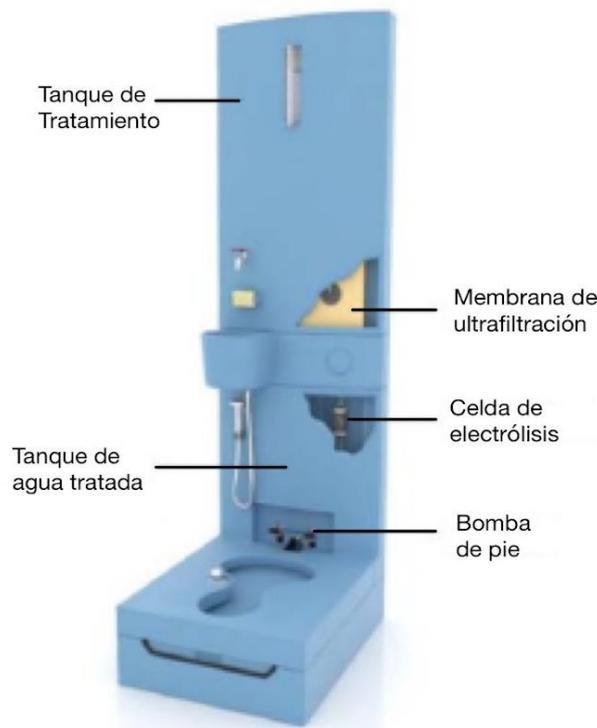


Figura 14: Diseño en 3D del retrete diseñado por EWAG. Vía: Eawag (Switzerland), 2013

La unidad de ultrafiltración es biológicamente activa auto eliminando los residuos que se atrapan haciendo que esta no tenga que ser reemplazada periódicamente, aunque se estima que debe cambiarse cada 2 años.

Una vez llenos los depósitos de orina y heces se deben vaciar y transportar a un punto de tratamiento seguro.

El agua filtrada queda ligeramente coloreada, con alrededor de 30-40 mg de DQO/L y se puede producir un crecimiento de microorganismos. El efluente debe pulirse o rellenarse para asegurar la eliminación de color, también se puede practicar una electrólisis como el anterior punto para eliminar estas sustancias y clorar el agua. (EWAG, 2011).

2.2.3 Técnicas de separación de líquidos y sólidos de las heces para su aprovechamiento

Dentro de este método existen dos tipos de proyectos que han llegado a fase de desarrollo y han sido probados en campo. Se basan en el concepto de separar la parte húmeda de la sólida de las heces. La parte húmeda se condensa, se filtra y se eliminan patógenos para conseguir agua potable. La parte seca se usa para ser combustionada y producir energía para el próximo ciclo de saneamiento.

Los dos proyectos más importantes son:

- **Inodoro de combustión seca, Universidad de Toronto:**
Es un sistema montado sobre un conjunto transportable. La parte líquida de las heces y la orina se separan por gravitación y se pasan por un filtro de arena para eliminar sus patógenos y poder reutilizar el agua. La parte sólida se pasa unos rodillos para aplanarse y secarse. Después se introducen en una cámara estanca de volumen constante en el que se hace una combustión sin llama, similar al

proceso de pasteurización. Los vapores que se obtienen de esta combustión son condensados. (Universidad de Toronto, 2015).

- **Inodoro con membrana de nanopartículas, Universidad de Cranfield:**
Consiste en un retrete convencional, con un cajón en la parte inferior y posterior, pero de descarga seca y todos los elementos del saneamiento están contenidos en el cajón. Las heces y la orina son separadas por sedimentación gravitatoria. Así con un tornillo sin fin se hace fluir los líquidos para su tratamiento y los sólidos son secados y granulados, para ser llevados a una cámara de combustión. Este microcombustor se alimenta de las heces secadas y produce energía para alimentar el sistema. Las aguas son evaporadas y condensadas para después filtrarlas por una nanomembrana que elimina la orina contaminada, para obtener finalmente agua potable (Universidad de Cranfield, 2013).

2.2.4 Técnicas de producción de biocarbón

El principal objetivo de este método es el de la producción de biocarbón de las heces a partir de su descomposición en ausencia de oxígeno, proceso que se conoce como pirólisis. Este biocarbón puede usarse para la producción de energía para el próximo ciclo y la obtención de agua potable.

Los dos proyectos más importantes son:

- **Reactor de biocarbón con residuos sólidos, Universidad de Stanford:**

Este proyecto desarrolla un pirolizador que emplea la materia orgánica de alta humedad en un proceso de combustión en dos etapas. Un intercambiador de calor a contracorriente proporciona la recuperación térmica durante el enfriamiento de los gases de escape, transfiriendo al aire de la admisión. La combustión se inicia con una cantidad residual de biogás del sistema digestor. Este es un sistema pensado para un sistema grande, para un uso de unas 200 personas diarias. (Universidad de Stanford, 2013).

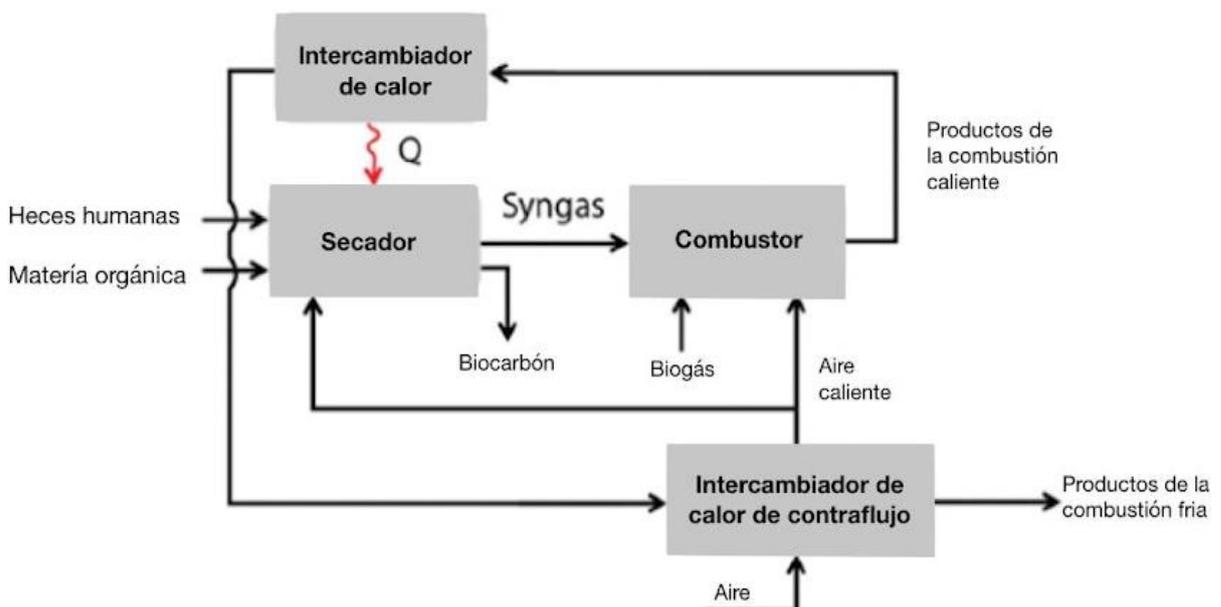


Figura 15: Diagrama de bloques del reactor de biocarbón. Vía: Universidad de Stanford, 2012.

- **Sistema sanitario descentralizado de bajo costo, Universidad de Singapur:**

Basa su sistema en un inodoro compacto con un desviador de orina y la producción de biocarbón para una combustión a partir de las heces que produzca energía para la recuperación de recursos.

La orina que es desviada pasa por un evaporador y las heces son transportadas por una red metálica. El líquido fecal se somete a una ósmosis directa que produce una solución fertilizante y agua limpia que se bombea al evaporador. Las heces se transfieren a un secador solar y después a una cámara de combustión donde se convierten en biocarbón. La cámara de ebullición de la orina, a presión negativa ($P_{\text{cámara}} < P_{\text{atm}}$), se alimenta del calor de la cámara de combustión de heces. Allí se hace ebullición del líquido fecal y la orina en condiciones de vacío. El vapor que se obtiene es condensado y filtrado por carbono activo y resinas obteniendo agua altamente purificada. (Universidad de Singapur, 2012).

3 Caracterización de los productos y residuos

Para poder diseñar el saneamiento se debe saber la caracterización química tanto de los residuos que se parte, heces y orina humana, como los productos que se desean obtener después de realizar el proceso de saneamiento, agua potable y abono orgánico. La producción que se tiene de estos residuos para los

3.1 Composición de las heces humanas

Las heces humanas, conocidas también como excrementos, deposiciones o materia fecal, son el conjunto de las deposiciones sólidas y líquidas que constituyen el producto final del proceso de la digestión de los alimentos que ingieren las personas. Están formadas por los restos de alimentos que no son absorbidos por el aparato digestivo, componentes que no son útiles para el ser humano. Además, también se componen con células del epitelio intestinal que se descama durante el proceso digestivo, nutrientes, microorganismos (virus, bacterias, parásitos...) y otras sustancias que se pueden encontrar en el tracto gastrointestinal (Guerrero Nieto, Diana Patricia; Ortiz Atancuri, Paulina de los Ángeles, 2011).

La orina humana es un líquido acuoso transparente y amarillento que se produce por la secreción y que es expulsado por el aparato urinario (RAE, 2001). Se componen principalmente de agua, sales minerales y ácidos. Además, como los excrementos se compone de células que se descaman del aparato urinario y de microorganismos.

Estos dos componentes mezclados que generan el aparato excretor del cuerpo humano son los que el producto que se diseña en la presente memoria ha de sanear.

3.1.1 Caracterización química de las heces y orina humana

Las heces humanas tienen una composición física de un elevado porcentaje de agua y el resto es materia seca. La composición física y química de las heces es:

Tabla 1. Caracterización física y química de las heces humanas expresando la concentración de los componentes en porcentaje másico. Vía: www.eautrice.org

COMPOSICIÓN FÍSICA	
Contenido de humedad	77% (afegir rang variabilitat)
Materia seca orgánica	23%
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MATERIA SECA	
Nitrógeno	6%
Fósforo (P ₂ O ₅)	4,2%
Potasio (K ₂ O)	1,75%
Carbono	47,5%
Calcio	4,5%

pH	7-9
----	-----

La orina humana tiene un porcentaje de agua aún mucho más elevada siendo en su mayoría agua y su parte sólida son los sólidos en solución. La composición física y química de la orina humana es la siguiente:

Tabla 2. Caracterización física y química de la orina humana expresando la concentración de los componentes en porcentaje másico. Vía: www.eautrice.org

COMPOSICIÓN FÍSICA	
Contenido de humedad	96%
Materia seca	4%
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MATERIA SECA	
Materia Orgánica	75%
Nitrógeno	17%
Potasio (K ₂ O)	3,5%
Fósforo (P ₂ O ₅)	3,25%
Calcio (CaO)	5,25%
Carbono	14%
pH	7-9

3.1.2 Producción de materia fecal de las personas

La cantidad de heces humanas que puede producir una persona es muy variable según la edad, género, cantidad de comida ingerida... pero típicamente se considera que la masa de heces que puede producir una persona al día es de 0,1 y 0,4 kg/día (Harold B.Gotaas, 1956). Para este proyecto cogemos una cantidad media baja y estimaremos en 0,25 kg/día.

La cantidad de orina humana que puede producir una persona también es muy variable según la edad, género, agua ingerida... pero típicamente se considera que la masa de heces que puede producir una persona al día es de 1,0 y 1,4 L/día (Harold B.Gotaas, 1956). Para este proyecto se escoge una cantidad media baja estimando en 1,25 L/día.

3.1.3 Coprología de las heces humanas

La parte coprológica de las heces es la que se dedica a su estudio y análisis desde un punto de vista médico (RAE, 2020), en el que se analizan las enfermedades que pueden producirse de los excrementos humanos. Así este es un punto importante de la composición de las heces para el proyecto.

Los patógenos más comunes que se pueden encontrar en las heces son los virus, principalmente los rotavirus, las bacterias (cómo la shigella, cólera, salmonela y otras) y

parásitos múltiples que pueden ser muy peligrosos para el ser humano y se pueden transmitir por la manipulación de las heces si no se hace un saneamiento correcto.

En la siguiente tabla podemos ver los principales patógenos que podemos encontrar en las heces humanas y las enfermedades que estas producen:

Tabla 3. Caracterización patogénica de las heces humanas. Vía: ONU, 2020

CLASE	NOMBRE DEL PATÓGENO	ENFERMEDAD	FUENTE
Acaro	Sarcoptes Scaibei	Sarna - Erupción con picor	Heces, contacto piel
Bacteria	Treponema Pertenues	Pian	Heces
	Chlamydia trachomatis	Tracoma	Heces, secreciones
	Vibrio cholerae	Colera - Diarrea	Heces
	Shigella dysenteriae	Shigellosis - Diarrea	Heces
	Salmonella enterica	Diarrea	Heces
	Escherichia coli	Diarrea	Heces
Helminthos	Schistosoma	Bilharzia	Agua contaminada
	Dracunculua medinesis	Enfermedad de Guinea	Heces y orina
	Ascaris lumbricoides	Infección intestinal	Heces
	Enterobius vermicularis	Infección intestinal	Heces
	Hymenolepis	Infección intestinal	Heces
	Wuchereia bancrofti	Filariasis linfática, linfedema	Heces
Virus	Hepatitis A&E	Hepatitis viral	Heces
	Rotavirus	Diarrea	Heces
	Adenovirus	Diarrea	Heces
	Entamoeba	Disentería amebiana	Heces

Protozoa	Cryptosporidium	Diarrea	Heces
	Cyclospora Cayetanensis	Diarrea	Heces
	Enterocytozoon bienewisi	Diarrea	Heces y orina
	Giardia	Diarrea	Heces
	Isospora belli	Diarrea - Dolor abdominal	Heces

3.1.4 Maneras de eliminar los patógenos

Para que el agua, lodo, abono o productos derivados obtenidos de las heces humanas sean seguros deben eliminar las bacterias, virus, hongos, lombrices y protozoos que contienen en ellas. Las maneras más seguras que hay en la actualidad son:

1. Lámparas UV-C: es el tipo de radiación ultravioleta que se sitúa en un intervalo de longitudes de onda de 280 a 100 nanómetros (Unión Europea, 2017). Se usa actualmente en muchas depuradoras como germicida y permite en el agua ser depurada de todo tipo de bacterias, virus y protozoos. Se expone el agua directamente a unos focos emisores de LED de UV-C para tratamiento y es una de las maneras más sencillas.
2. Choque térmico: también conocida por desinfección térmica, se eleva la temperatura del agua a 70°C durante un tiempo mínimo de 2h. A esta temperatura todos los patógenos mueren y se destruyen, muchos no pueden soportar temperaturas superiores a 55°C (Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición, 2021).
3. Cloración: consiste en aplicar una pequeña cantidad en el agua, que, de una concentración muy baja, de cloro no jabonoso. El cloro en disolución es de carga negativa y lo hace un oxidante natural. Entonces cuando se disuelve es capaz de oxidar y destruir todo tipo de patógenos que encuentra excepto los protozoos y helmintos.
4. Filtración: el agua pasa por un filtro que existen de diferentes tipos y tamaños de paso. Este permite pasar las moléculas de agua y retiene en él sólidos en suspensión y/o microorganismos dependiendo del filtro.
5. Compostaje: en este caso la materia orgánica se degrada por una oxidación natural. Los patógenos son eliminados por la falta de materia orgánica de la que nutrirse y la oxidación propia de la degradación. Es el mismo proceso que se detalla en el punto 2.1.5.

3.2 Requerimientos legales del agua potable

El agua potable es aquella agua que se usa para el consumo humano. Estas aguas son todas aquellas aguas ya sea en su estado original, ya sea después del tratamiento, utilizadas para beber, cocinar, preparar alimentos, higiene personal y para otros usos domésticos, sea cual fuere su origen e independientemente (Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030, 2020).

Los parámetros sanitarios del agua potable se rigen según la ley RD 140/2003 y los que lo modifican son el RD 314/2006 y RD 902/2018 en España que es la normativa de referencia que se cogerá para este proyecto.

Estas leyes regulan los parámetros químicos y biológicos que debe cumplir el agua potable, así como también las normas que tienes que seguir para almacenarse en depósitos y los requerimientos de los materiales para su distribución.

Tabla 4. Parámetros de control biológico del agua potable. Vía: Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030, 2003.

Parámetro	Valor paramétrico
Escherichia coli	0 UFC en 100 ml
Enterococo	0 UFC en 100 ml
Clostridium pefrigens	0 UFC en 100 ml

Las concentraciones biológicas están expresadas en UFC, que es las Unidades Formadoras de Colonias. Este parámetro indica el número de células de un organismo en el agua (Merus, 2018).

Los patógenos que se muestran en estos parámetros de control son parásitos y bacterias, que también aparecen en la tabla 2.3. No se tienen en cuenta los virus, ya que por su condición no pueden vivir en agua potable sin materia orgánica con la que reproducirse.

Aunque la normativa indica que no puede haber ningún tipo de bacteria, parásito o microorganismo que pueda llegar a ser una UFC. La OMS recomienda que el máximo puede ser 100 UFC en 100 ml.

3.2.1 Composición química del agua

En la siguiente tabla se determinan los parámetros biológicos que debe cumplir el agua potable.

Tabla 5. Parámetros de control químico del agua potable. Vía: Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030, 2003.

Parámetro	Valor paramétrico
Antimonio	5 µg/l
Arsénico	10 µg/l
Benceno	1 µg/l
Benzo(α)pireno	0,010 µg/l
Boro	1 µg/l
Cadmio	5 µg/l
Cianuro	50 µg/l

Cobre	2 µg/l
Cromo	5 µg/l
Fluoruro	1,5 µg/l
Hidrocarburos	0,1 µg/l
Mercurio	1 µg/l
Niquel	20 µg/l
Nitrogeno	70 µg/l
Plaguicidas	0,5 µg/l
Plomo	10 µg/l
Selenio	10 µg/l
Cloro	110 µg/l

3.2.2 Depósito y redes de distribución

Según la normativa los depósitos de abastecimiento tienen que ser estancos, siempre tapados, con desagüe y un registro que permita su acceso para la limpieza. La limpieza tiene que ser desincrustante, de desinfección y con un posterior aclarado con agua.

Los materiales de los que deben estar contruidos los depósitos y las redes de distribución deben seguir la normativa RD 363/1995 y RD 1078/1993.

3.3 Requerimientos legales del abono orgánico

Los abonos o fertilizantes son aquellas sustancias orgánicas o inorgánicas, ya sea en estado líquido o gaseoso, cuya función principal es aportar nutrientes a las plantas (Unión Europea, 2003). Estos se suelen verter en el suelo mejorando la calidad del sustrato al aumentar la concentración de nutrientes que estimula el crecimiento vegetal y optimiza el rendimiento de los cultivos.

Las plantas se alimentan de dos maneras. Una es por la fotosíntesis absorbiendo CO₂. Y la otra son los nutrientes que absorben por las raíces. Las plantas sintetizan los nutrientes desde sus elementos a diferencia de los animales que necesitan largas cadenas de aminoácidos, glúcidos o proteínas. Solo necesitan de nutrientes los elementos químicos (Guy Sela, 2020).

3.3.1 Clasificación de los nutrientes

Los nutrientes se pueden clasificar según su aportación en los vegetales según la siguiente tabla:

Tabla 6. Elementos químicos según su clasificación nutricional. Vía: Unión Europea, 2003.

Nutrientes	Elementos químicos
Principales	Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K)
Secundarios	Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na) y Azufre (S)
Micronutrientes	Boro (B), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Molibdeno (Mb) y Zinc (Zn)

3.3.2 Clasificación de los fertilizantes

Los fertilizantes tienen diferentes clasificaciones. Se clasifican según su contenido de nutrientes y según su procedencia.

En la siguiente tabla está la clasificación según su contenido de nutrientes:

Tabla 7. Clasificación de abonos según su contenido. Vía: Ministerio de la presidencia, 2003

Tipo de abono	Definición
Abono simple	Abono nitrogenado, fosfatado o potásico con un contenido declarable de un único nutriente principal.
Abono compuesto	Abono obtenido químicamente o por mezcla, o por una combinación de ambos, con un contenido declarable de, al menos, dos de los nutrientes principales.
Abono de mezcla	Abono compuesto obtenido mediante reacción química, mediante solución, o en estado sólido mediante granulación, y con un contenido declarable de, al menos, dos nutrientes principales. En su estado sólido cada gránulo contiene todos los nutrientes en su composición declarada.

En la siguiente tabla está la clasificación según su origen de procedencia:

Tabla 8. Clasificación de abonos según su procedencia. Vía: Ministerio de la presidencia, 2003.

Tipo de abono	Definición
Abono inorgánico o mineral	Abono obtenido mediante extracción o mediante procedimientos industriales de carácter físico o químico, cuyos nutrientes declarados se presentan en forma mineral.
Abonos órgano-minerales	Producto cuya función principal es aportar nutrientes para las plantas, los cuales son de origen orgánico y mineral, y se obtiene por mezcla o combinación química de abonos inorgánicos con materiales carbonados de origen animal o vegetal o abonos orgánicos.
Abonos orgánicos vegetales	Producto cuya función principal es aportar nutrientes para las plantas, los cuales proceden de materiales carbonados de origen vegetal.
Abonos orgánicos animales	Producto cuya función principal es aportar nutrientes para las plantas, los cuales proceden de materiales carbonados de origen animal.

3.3.3 Características químicas del abono orgánico de origen animal

Los fertilizantes de origen animal pueden ser distintos tipos según las clasificaciones anteriores.

Tabla 9. Propiedades del abono orgánico de origen animal. Vía:Ministerio de la presidencia, 2003.

Denominación del tipo	Informaciones sobre la forma de obtención	Contenido mínimo de nutrientes (porcentaje en masa)
Abono orgánico NPK de origen animal	Producto sólido obtenido por tratamiento de excrementos animales, con o sin cama, sin ácidos minerales.	<ul style="list-style-type: none"> -N+P₂O₅+K₂O: 6%. -C/N no mayor de 10. -Cada nutriente debe ser al menos un 1,5%. -El N orgánico de ser al menos un 50% -El N nítrico no debe exceder del 1,5%.

4 Fuentes de energía aplicables al diseño

Para el proyecto se requiere una parte de energía para poder realizar un saneamiento activo. Debido a los requerimientos del proyecto del apartado 1.3 el sistema tiene que ser independiente de fuentes de energía externa al producto. Por este motivo se buscan sistemas de energía que sean independientes poniendo especial énfasis en los sistemas de energía renovable para minimizar la huella de carbono del producto y en los que producen energía eléctrica y energía térmica.

Las fuentes de energía según su origen pueden ser renovables o no renovables. Las energías renovables son todas aquellas que provienen de recursos naturales y de fuentes inagotables, todas aquellas que, al producirlas, no contaminan (Factor Energía, 2021). Las fuentes de energía no renovables son aquellas que se encuentran en la naturaleza en una cantidad agotable, no se regeneran o lo hacen de una forma muy lenta en relación con la esperanza de vida humana (Grupo Novelec, 2018).

Dentro de las energías no renovables también se pueden encontrar energías limpias, que por el origen de su combustible tienen una huella de carbono neutral.

4.1 Energía solar

La energía solar es aquella que se obtiene a partir de la radiación electromagnética llegada del sol. Esta radiación en forma de calor y luz se puede aprovechar mediante diversas tecnologías para generar principalmente energía eléctrica y térmica (Moreno Martín, 2016).

Las principales tecnologías que permiten obtener energía solar son dos, una permite obtener energía eléctrica y la otra energía térmica. Estas dos son:

- **Energía solar fotovoltaica:** Se basa en el efecto fotovoltaico. Usa unos paneles con una película de semiconductores de silicio, que cuando la radiación solar incide sobre ellas produce un flujo de electrones que crea una diferencia de potencial que crea una corriente eléctrica (IDAE, 2021). Con la combinación de diferentes paneles conectados en serie conocida como “string” se puede conseguir un potencial deseado. Y con la combinación de distintos “strings” se puede aumentar la potencia del sistema. Esta corriente después pasa por un inversor eléctrico que corrige la energía eléctrica a una corriente alterna de la frecuencia deseada. Esta puede ser conectada directamente a una red eléctrica o para abastecer sistemas independientes.
- **Energía solar térmica:** es la energía en forma de calor que procede del sol que se aprovecha mediante unos captadores para acondicionar el agua, pueda ser sanitaria o de aplicación industrial (Grupo Villar Mir, 2019). Los colectores solares contienen el fluido a calentar, la radiación solar incide sobre ellos calienta el fluido que va por dentro de unos tubos colocados en paralelo con una alta transmisividad de calor y entre unas con la mayor absorción solar y mínima emisión térmica posible. Hay muchos tipos de captadores solares, de alta y baja temperatura. Este proyecto se focaliza en los de baja temperatura, ya que los de alta temperatura son para instalaciones de gran tamaño, que son las de más de 100m². (IDAE, 2020). Los dos principales pueden ser los captadores planos y los de vacío. Los planos son como los descritos anteriormente que aprovecha directamente la radiación solar, y

los de vacío similares pero las tuberías que contienen los fluidos se encuentran dentro de unos tubos de vidrio que se les hace el vacío y disminuyen las pérdidas de aire.

4.2 Energía eólica

Es la energía que se puede obtener del aprovechamiento del accionamiento mecánico que produce la energía cinética del movimiento del aire. Principalmente, se usa para la generación de energía eléctrica mediante la tecnología de los aerogeneradores.

Para ello se construyen unos molinos de viento, estos son accionados por el viento. Al girar pasan accionan un generador eléctrico, en algunos casos previamente pasan por una relación de engranajes que ajusta la velocidad del giro para accionar un motor generador eléctrico que produce una corriente alterna.

Generalmente, los aerogeneradores son para generar grandes potencias, ya que suelen ser equipos muy grandes pensados para potencias muy elevadas del orden de megavatios. Pero hay pequeños dispositivos pensados para casas o pequeños edificios que son aerogeneradores de tamaño mucho más reducido. Son conocidos como minieólica y pueden tener una potencia de pico de 50kW (EDP Energía, 2021).

4.3 Biogás

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas, que con un contenido de metano superior al 45% es inflamable. Este se obtiene a partir de una respiración anaeróbica de materia orgánica, como podrían ser las heces humanas para este proyecto. Esta se produce cuando un grupo de bacterias anaeróbicas entran en contacto con el lodo dentro de los que se conoce como reactor anaeróbico. Este después se puede usar para la combustión que produzca energía (Ministerio de energía de Chile, 2011).

4.4 Biomasa

La biomasa se define como la fracción biodegradable de los productos, residuos y desechos de origen biológico procedentes de actividades agrarias, incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal, de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos, incluidos los residuos industriales y municipales de origen biológico (Unión Europea, 2018). Una vez totalmente seca la materia orgánica se usa para quemar y producir energía térmica.

A pesar de que las heces humanas secas se pueden considerar como biomasa requieren de una fuente de energía externa para que se puedan quemar y producir energía y serían de difícil aplicación para este proyecto, pero permitirían obtener una cantidad de energía considerable. Además, dado que las heces humanas son en un 77% agua la cantidad de biomasa que se podría obtener sería muy pequeña.

Suponiendo con los datos de producción de heces humanas y su composición física del apartado 2.2, con una producción diaria de 0,25 kg/persona, si los baños que se están diseñando en este proyecto lo usaran unas 50 personas al día, se podría obtener una

cantidad de biomasa aproximadamente 2,8 kg. Si la biomasa tiene un poder calorífico de 4 kWh (IDAE, 2020), en total se podrían obtener 11,2 kWh por día de energía térmica.

4.5 Análisis de las fuentes de energía aplicables al diseño

Después de encontrar cuatro tipos de tecnologías para la generación de energía para poder hacer un saneamiento activo, comparemos las diferentes fuentes de energía en la siguiente tabla para hacer un análisis de ellas y seleccionar las que mejor encajan en el diseño:

Tabla 10. Comparativa de puntos clave de las tecnologías de generación de energía renovable aplicables al diseño del proyecto. Vía: propia.

	Solar Fotovoltaica	Sola Térmica	Mini Eólica	Biogas	Biomasa
Energía Renovable?	SI	SI	SI	SI	SI
¿Permite obtener energía térmica?	SI	SI	SI	SI	SI
¿Permite obtener energía eléctrica?	SI	NO	SI	SI*	SI*
¿Es peligrosa?	NO	NO	NO	SI	SI
¿Tecnología complicada de diseño e implementación?	NO	NO	NO	SI	SI

Comparando las fuentes de energía las más interesantes para el diseño resultan ser la solar fotovoltaica y el biogás. Las dos sirven para producir electricidad, pero dado que la fotovoltaica es más sencilla de diseño e implementación y menos peligrosa para los usuarios es la favorita como fuente de energía.

Después se contempla adicionar minieólica como complemento para períodos de lluvia, donde la generación de fotovoltaica sería escasa, para completar la energía que se pueda necesitar para el saneamiento del diseño.

La solar térmica no se descarta para poder ser usada para hacer un tratamiento de choque térmico para las heces para su desinfección, o hacerlo en las aguas que se puedan obtener.

La fuente de energía que queda descartada es la biomasa, ya que para poder producir energía tanto térmica como eléctrica son difíciles de diseño y la cantidad de energía que se puede obtener es muy baja.

5 Contexto de la población y ubicación

El emplazamiento seleccionado para el sistema de saneamiento autónomo es la ciudad de Arusha, de la región de Arusha al norte de Tanzania.

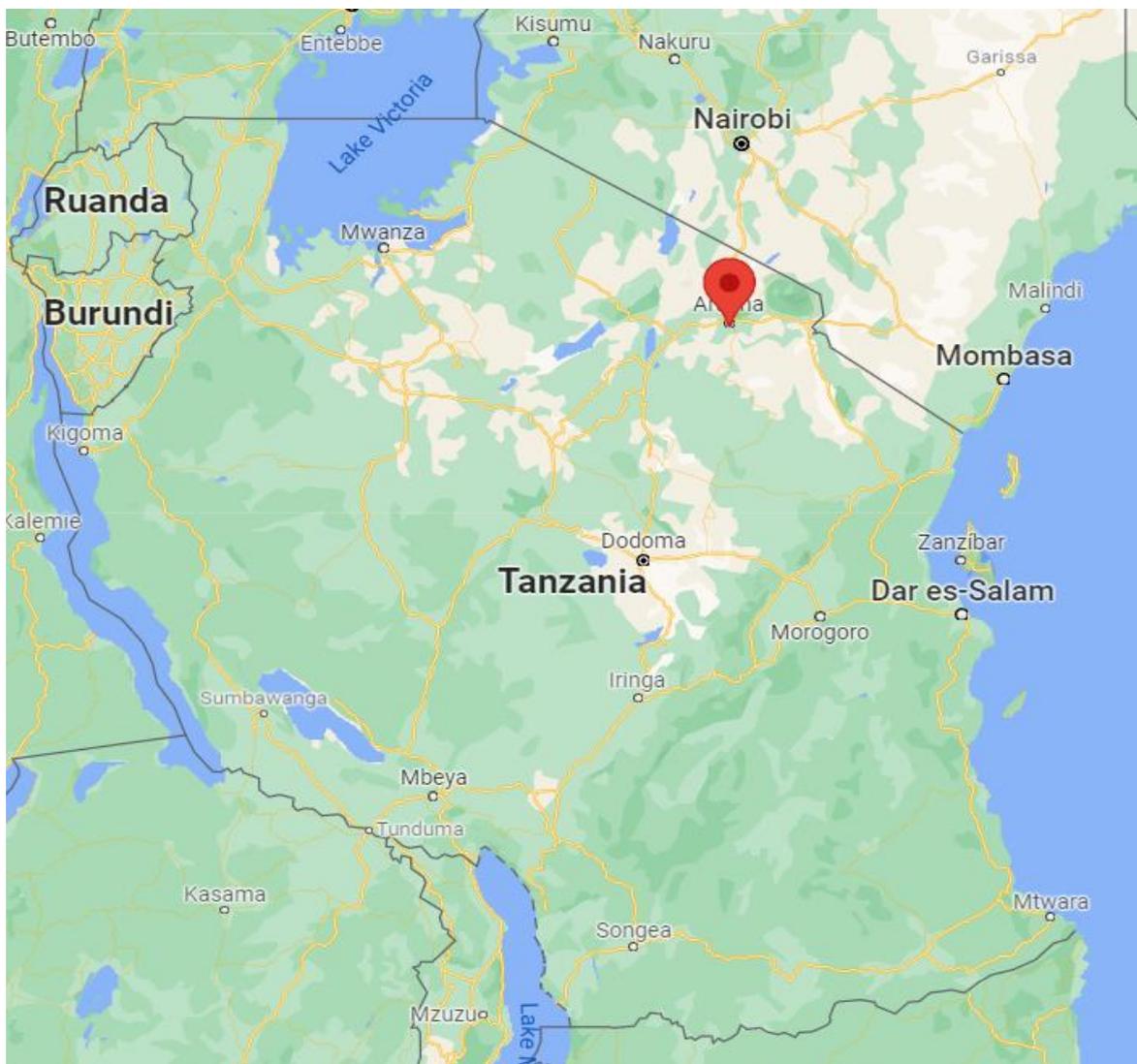


Figura 16: Mapa con la ubicación de la ciudad de Arusha en Tanzania, marcada con un pin rojo.
Vía: Google Maps.

La ciudad se caracteriza por tener una población de 416.442 habitantes en el censo de 2012 (Instituto estadístico de Tanzania, 2012). Está situada a unos 1.400 metros por encima del nivel del mar. Tiene un clima tropical con dos estaciones marcadas, una seca y una húmeda.

5.1 Climatología de la ciudad

Arusha tiene una temperatura media de 17°C (de 25°C si se contempla solo el día) que oscila entre los 10 y 30°C. Los meses de estación húmeda, que es cuando se producen las lluvias con más frecuencia, es de noviembre a abril.

En la siguiente tabla se pueden observar las principales medias de las condiciones climáticas de la ciudad.

Tabla 11. Resumen mensual de las condiciones climáticas de la ciudad de Arusha de 2019. Vía:
www.weatherbase.com

	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura Media [°C]	17	19	19	19	19	19	14	14	15	16	18	18	18
Temperatura media alta [°C]	25	28	28	27	25	22	21	20	22	24	26	27	27
Precipitación media [mm·m2]	1230	50	80	170	360	210	30	10	10	20	30	110	100
Durada media del día [hrs]	12,5	12,7	12,6	12,5	12,4	12,3	12,3	12,3	12,4	12,4	12,5	12,6	12,7
Radiación solar media [Mj/m2]	20,1	22,6	24,4	22,8	20	17,7	16,2	16,3	17,5	21,2	21,6	19,8	20,8
Días de lluvia	7	8	7	13	17	11	3	1	2	1	7	14	13

5.2 Contexto de la población

Arusha es una ciudad que pertenece a una región de pobreza económica. En 2014 había un registro de 134.641 personas que tenían un empleo legalizado en toda la región de Arusha. La población se estima que es un 31,3% urbana. El resto de la población es agrícola y viven de la agricultura y ganadería. A nivel nacional este sector representa un cuarto del PIB, ocupa el 80% de mano de obra del país que viven con una renta per cápita de 1.700\$ al mes (CIA, 2013).

A pesar de ser una ciudad muy turística y diplomática la cobertura de agua sanitaria sólo es del 44% y el acceso a sistemas de saneamiento es del 7,6% (Africa Development Bank Group, 2015).

6 Diseño del saneamiento

Con los criterios argumentados en la justificación se diseña el sistema de saneamiento autónomo, basándose en distintas etapas y tecnologías vistas en el apartado 2. Decidiendo mediante distintos criterios que se explican y desarrollan más adelante para seleccionar la mejor alternativa en cuanto a proceso y tecnología para poder producir un saneamiento total.

6.1 Determinación del proceso a seguir

Para la selección del proceso a seguir para el diseño de este proyecto primero se identifican las etapas que hay en el saneamiento, que se obtiene de cada una de las etapas y de qué sustancias puede partir.

Las diferentes etapas o procesos que se encuentran en los sistemas de saneamiento autónomos explicados en el apartado 2.1 son las siguientes:

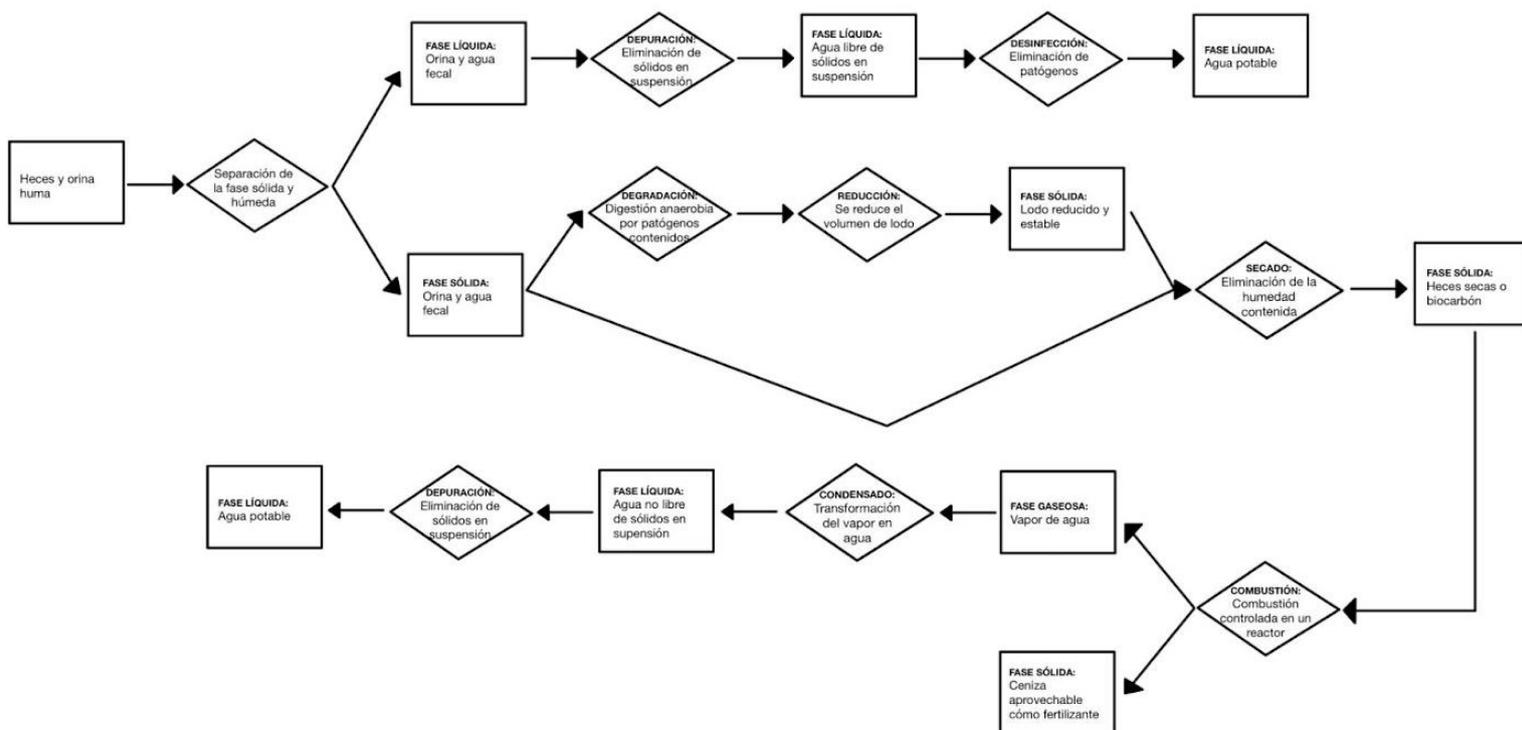


Figura 17: Diagrama de proceso del saneamiento autónomo. Vía: propia.

Con las etapas necesarias para que se pueda producir el saneamiento necesario para poder llegar a obtener como productos finales agua y fertilizantes de todo el proceso. Para poder evaluar las diferentes tecnologías que podemos utilizar para cada una de las etapas del diagrama anterior se realiza un esquema típico de todos los sistemas de saneamiento autónomos, tanto de los conservadores como de los más innovadores.

En este esquema, que se incluye en el Anexo I, apartado 6, se muestra la evolución de los productos de partida que pueden tener los sistemas, y en que se van transformando. Entre cambios de estado o producto se marca la tecnología o proceso que se usa y después de esta las posibles reacciones que puede producir. Dentro de este esquema se marcan cada una de las etapas que se obtienen en el diagrama de procesos.

El código de colores usado es el siguiente:

- Amarillo: producto o componente.
- Rojo: proceso o tecnología que se usa en alguna etapa.
- Verde: aportación tecnológica como mejora.
- Lila: reacción química o proceso físico que se produce.
- Naranja: tipo de fuente de energía que se puede producir

6.1.1 Selección de alternativas para el diseño

Para la selección de cada etapa del proceso se usa un criterio de evaluación de alternativas, analizado sus características y seleccionando las que mejor se adapten al entorno y a los requerimientos y criterios de diseño mencionados.

6.1.1.1 Selección del proceso principal para las heces entre combustión o compostaje

Para la primera etapa debemos seleccionar si escoger entre un proceso de compostaje o otros procesos como una degradación anaerobia, un secado o similares que puedan permitir usar las heces para generación de calor que sea recuperable o convertible en energía eléctrica.

Para esta etapa se tienen en cuenta los siguientes criterios de diseño:

A1 - Eliminación de patógenos: expresa el nivel de eliminación de patógenos que tiene el proceso.

A2 - Dependencia de fuentes de energía renovables: la cantidad de energía producida por sistemas de energía renovable adheridos al sistema.

A3 - Dificultad de proceso: la complejidad que puede tener el proceso, los factores que interfieren en él y que pueden hacer que su resultado sea el no esperado.

A4 - Dificultad de diseño: se analiza la complejidad que puede tener el equipo a la hora de realizar su diseño.

A5 - Disponibilidad local de materiales para fabricación: si los materiales empleados en el sistema o conjunto se pueden encontrar en disponibilidad local.

En la siguiente tabla se explica la evolución de cada proceso según estos criterios de diseño:

Tabla 12. Resumen de las evaluaciones de los criterios de diseño. Vía: Propia.

Criterio de diseño		Proceso de compostaje	Procesos de combustión y/o secado
A1	Eliminación de patógenos	Alta. La eliminación de patógenos es total solo si el proceso se da en sus óptimas condiciones y en el tiempo correspondiente, sino no se puede garantizar.	Total. La eliminación de patógenos en las heces es total dado el choque térmico por las temperaturas de combustión.
A2	Dependencia de fuentes de energía renovable	Alta dependencia. Porque este proceso no produce energía, y para garantizar que se de correctamente se debe poner un sistema de control que dependerá de la electricidad.	Baja dependencia. El sistema puede depender de fuentes de energía renovables, pero puede ser capaz de producir por sí mismo la energía que requiere.
A3	Dificultad de proceso	Es elevada. Para que el proceso se produzca correctamente se debe garantizar una temperatura entre 40-	Media. El proceso no depende de factores ambientales externos, pero si de un correcto diseño y mantenimiento.

		50°C y una humedad de entre el 50-70%.	
A4	Dificultad de diseño	Fácil. Se compone de una cámara simple que se debe dimensionar bien para el tiempo de uso que se le quiera dar.	Difícil. Se requiere de un buen diseño y balance energético, para que el sistema funcione correctamente.
A5	Disponibilidad local de materiales	Los materiales para la fabricación de un reactor se pueden encontrar en cualquier sitio. Ya que solo se necesitaría acero, algún tipo de plástico termoestable y electrónica muy sencilla.	Los materiales que se pueden necesitar en este apartado requieren de una fabricación y confección más complicada, que solo pueden encontrarse en ciudades en distribuidores industriales.

Evaluando los criterios se decide seleccionar un proceso de combustión de las heces humanas. Principalmente ya que el criterio más importante es el de la eliminación total de patógenos, que en el caso de compostaje no se garantiza, además sigue la línea de diseño del proyecto de poder aprovechar la energía de las heces para otras etapas del saneamiento y reducir la dependencia de fuente de energías renovables.

6.1.1.2 Selección entre reducción de volumen por degradación anaeróbica o no

Esta segunda etapa se debe seleccionar entre sí aplicar una reacción anaeróbica para reducir el volumen de barro o pasar el barro directamente a una estación de secado.

Para la reducción del volumen del barro se puede decidir entre un reactor anaeróbico, un reactor anaeróbico con filtros y una fosa séptica.

Para decidir la mejor tecnología o proceso se decide evaluar bajo el criterio de Valor Técnico Ponderado. La media que se obtiene por cada punto se obtiene de la siguiente fórmula:

$$VTP = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \times g_i}{p_{\max} \times \sum_{i=1}^n g_i}$$

Los criterios para esta parte y su ponderación son:

- **B1 - 20 - Reducción de la DBO:** evalúa la reducción que hay de DBO en el sólido final que se obtiene.
- **A2 - 25 - Dependencia de fuentes de energía renovables:** evalúa la cantidad de energía producida por sistemas de energía renovable adheridos al sistema. Siendo 4 ninguna.
- **A3 - 25 - Dificultad de proceso:** evalúa la complejidad que puede tener el proceso, los factores que interfieren en él y que pueden hacer que su resultado sea el no esperado. Siendo un 5 un proceso muy sencillo y un 0 para un proceso muy complejo que se pueda dar en unas condiciones muy concretas.
- **A4 - 15 - Dificultad de diseño:** se analiza la complejidad que puede tener el equipo a la hora de realizar su diseño. Siendo un 5 un sistema fácil de diseñar y un 0 un sistema muy complejo de diseño.

- **A5 - 5 - Disponibilidad local de materiales para fabricación:** puntúa si los materiales empleados en el sistema o conjunto se pueden encontrar en disponibilidad local. Siendo 5 una disponibilidad total y el 0 una disponibilidad de materiales que requeriría ser importado.

Una vez puntuado los diferentes criterios de elección, se obtienen los siguientes valores ponderados con las puntuaciones dadas en la siguiente tabla a los criterios seleccionados.

Tabla 13. Resumen de las puntuaciones dadas por cada criterio y su VTP obtenido. Vía: Propia.

Criterios de evaluación		Peso	Reactor an-aerobio		Sin proceso in-termedio		Reactor anaerobio con filtros		Fosa séptica	
			G	P	PXG	P	PXG	P	PXG	P
B1	Reducción de DBO en sólido	20	3	60	1	20	4	80	2	40
A2	Dependencia de fuentes de energía	20	4	80	4	80	3	60	5	100
A3	Dificultad de proceso	25	3	75	1	25	4	100	2	50
A4	Dificultad de diseño	15	3	45	1	15	2	30	4	60
A5	Disponibilidad local de materiales	5	3	15	1	5	2	10	4	20
SUMA		85	275		145		280		270	
VALOR TÉCNICO PONDERADO			0,81		0,43		0,82		0,79	

Con la puntuación obtenida se ve que la mejor opción es en un reactor anaerobio con filtros. Y muy similar en puntuación un reactor anaerobio simple. Esta selección queda condicionada a que se requiera un mayor volumen sólido para la combustión de las heces para su producción de energía.

6.1.1.3 Selección del proceso de secado

El secado es el proceso mediante el cual se deshidratan las heces humanas. Se produce por la aplicación de calor que no supere la temperatura de ebullición, para no degradar la parte seca, para que la fase líquida de las heces se evapore.

Para el secado existen distintas alternativas tecnológicas que pue consigan este proceso:

- **Secador solar:** se tratan de unas cámaras aisladas que se basan en el efecto invernadero. Pueden ser directos o indirectos, ambos se expone el producto a secar

a la incidencia solar, en los directos el producto se expone directamente y en los indirectos el producto se pone en una cámara que concentra la incidencia solar y tiene una aireación, que arrastra la humedad aireando la zona.

- **Secado por ebullición:** consiste en la aplicación de una potencia calorífica que caliente la cámara en la que se encuentran las heces húmedas hasta el punto de ebullición convirtiendo la humedad en vapor de agua que después es evacuado. Este vapor se evacua mediante una chimenea. Después puede ser condensado para aprovecharlo para agua potable.

Entre estas dos alternativas se decide hacer el secado por ebullición porque permite recuperar el contenido de agua hay en ellas condensando el vapor, el proceso de evaporación es considerablemente más lento y depende de la climatología para poder llevarse a cabo. Así que el proceso seleccionado es un secador por ebullición.

Las tecnologías se pueden usar para este proceso:

- Energía solar térmica.
- Placa radiante eléctrica.
- Recuperación de calor de combustión de las heces humanas.

Las combinaciones que se pueden obtener podrían ser:

- A. Energía solar térmica para precalentar un circuito de agua cerrado y que recircule contra un serpentín que intercambie calor con la cámara de secado, esto permitiría elevar la temperatura hasta entre 70° y 80°C, después usar una placa radiante alimentada con energía solar fotovoltaica para proporcionar la energía necesaria para llegar hasta 100°C.

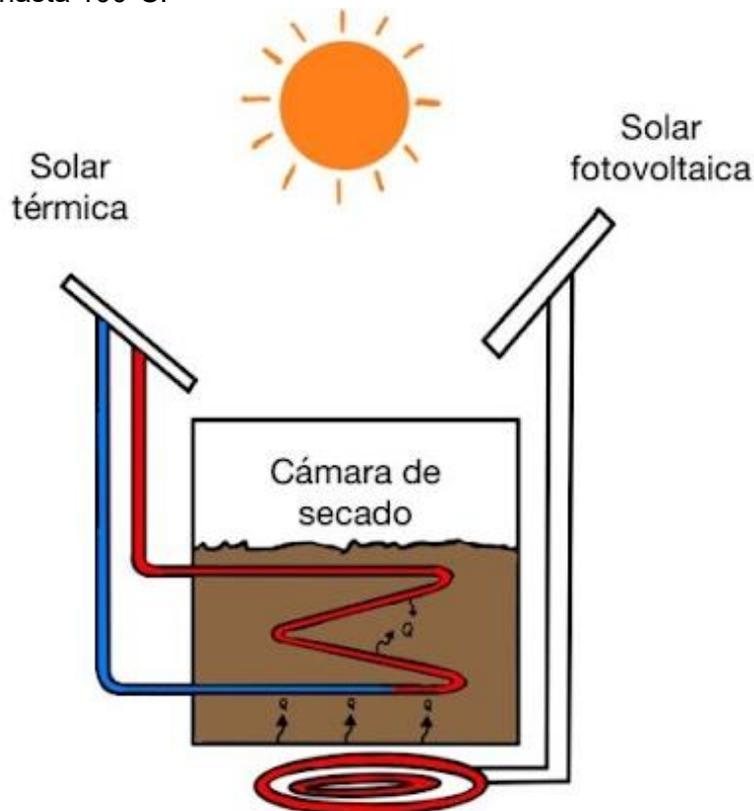


Figura 18: Ilustración de esquema de concepto de la combinación de tecnologías. Vía: propia

- B. Recuperar el calor de la combustión de las heces secas. Se absorbe el calor que se produce de la combustión de las heces secas, por ejemplo, usando el combustor como placa radiante, permitiendo elevar la temperatura hasta 100°C para evaporar el agua contenida en el lodo. También se puede añadir, en caso de ser necesario, una placa radiante alimentada con energía solar fotovoltaica o cualquier otra fuente de energía renovable.

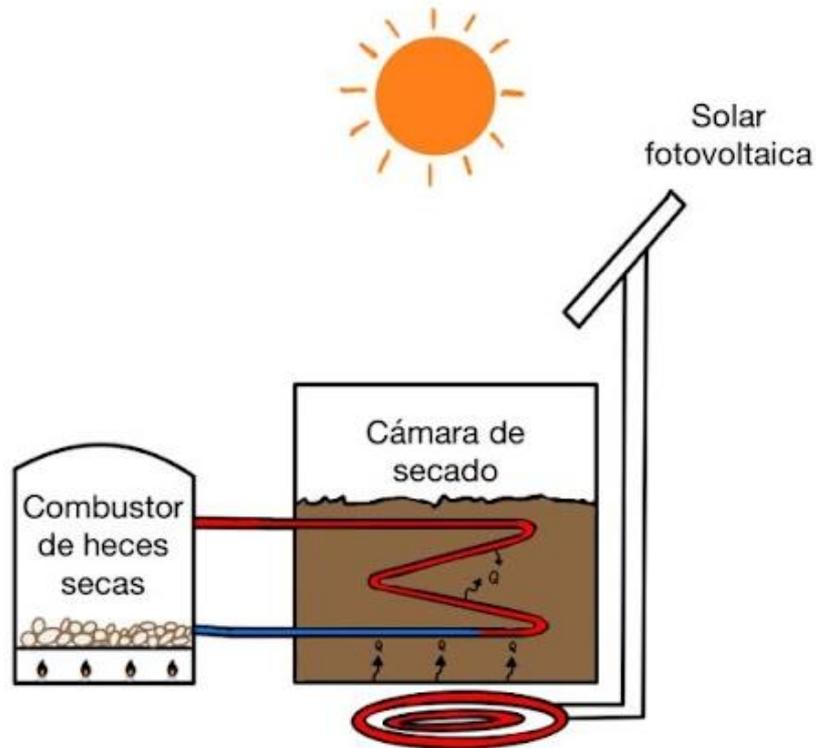


Figura 19: Ilustración de esquema de concepto de la combinación de tecnologías. Vía: propia

Para poder seleccionar la mejor tecnología para el proceso de secado se debe primero evaluar si el proceso de combustión de heces es viable. Para ello se hace un cálculo para evaluar si el calor obtenido sería suficiente para evaporar las heces humanas.

Se harán dos versiones de cálculo, con un reactor anaerobio intermedio y sin reactor anaerobio intermedio.

Para los cálculos se hacen las siguientes suposiciones:

- La producción de heces humanas por ciclo de combustión es de 50 personas
- En el caso del reactor anaerobio supondremos que influye la reducción de sólidos en suspensión en el volumen total del lodo.
- Las características físicas y químicas de las heces y orina son las ya presentadas en el apartado 2.2.
- La temperatura inicial en la que se encuentra el lodo es de 20°C.
- Se supone un proceso de flujo estacionario.
- El volumen de control que se usa es el secador donde se produce la ebullición y se supone este como adiabático y a presión atmosférica.
- El mecanismo de transferencia de energía es por calor.

Primero se debe saber que cantidad de agua ha de evaporarse, siendo esta de 9.65kg. Partiendo de la producción de heces y la cantidad de humedad contenidas en ella del apartado 3.1.

Una vez sabemos esto hemos de calcular el calor de vaporización del agua. Esta se obtiene de la siguiente ecuación con sus valores de constantes (Çengel y Boles, 1999):

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T + m \cdot h_v$$

Donde:

- C_p (Calor Especifico): 4,182kJ/kg·°C
- h_v (Entalpía de vaporización): 2.257kJ/kg
- m (masa): 9,56 kg
- ΔT (incremento de temperatura): 80°C

$$Q = 24.775,31\text{kJ}$$

Ahora sabiendo la cantidad de energía que puede producir a partir de la combustión de las heces secas. Partiendo de la masa de heces secas que se obtienen después del secado siendo esta de 2,87 kg.

Para ello se coge de referencia el HHV (Poder Calorífico Máximo) de las heces humanas (Onabanjo et al. 2016). Y conseguimos obtener la energía que se obtiene según la siguiente ecuación:

$$Q = HHV \cdot m$$

Donde:

- HHV(Poder calorífico): 24.730kJ/kg
- m (masa): 2,87 kg

$$Q = 7.795,10 \pm 0,1\text{kJ}$$

Queda comprobado que la energía producida por la combustión de las heces secas produce suficiente energía para aprovecharse para el secado de estas en un ciclo combinado y se selecciona como el proceso.

6.1.1.4 Selección del combustor

Debido a la selección hecha en el anterior punto, no se puede seleccionar finalizar el proceso en el secado se requiere realizar un proceso de combustión con las heces secas. Esta combustión deberá ser:

- Con presencia de Oxígeno.
- Con separación de ceniza.

6.1.1.5 Selección del proceso de depuración

La etapa de depuración consiste en la eliminación de los sólidos suspendidos que se encuentran en el agua, tanto orgánicos como inorgánicos. En esta etapa destacan dos tecnologías que son:

- Reactor electroquímico (explicado en el punto 2.1.1).
- Filtrado, consiste en hacer pasar el agua por un medio poroso para separar el agua de las partículas en suspensión (Universidad de Lima, 2011).

Para evaluar primero se comentan las ventajas y desventajas de los dos métodos para poder hacer una primera valoración cualitativa.

- REACTOR ELECTROQUÍMICO

- +Permite unificar en la misma etapa la desinfección, por la generación de cloro que se produce.

- +El consumo energético del proceso es muy bajo.

- Requiere una etapa de filtrado posterior.

- Las placas usadas como ánodos son de Titanio y Óxidos de Titanio, que son una composición compleja de encontrar.

- Difícil cuantificar la finalización del proceso.

- Difícil cuantificación

- FILTRADO

- +Se puede garantizar una eliminación total de los múltiples sólidos en suspensión.

- +Aún con la saturación del filtro, se reduce la presión y caudal del circuito, pero no invalida el proceso.

- +Bajo consumo de energía.

- +Fácil mantenimiento y sustitución de los componentes.

- El proceso puede requerir de diversas etapas de diferentes filtros.

- No realiza la etapa de desinfección.

- Dependiendo del filtro puede ser de difícil acceso.

Después de comparar los pros y contras de las dos tecnologías propuestas para el filtrado, se decide decantarse por el filtrado, porque el reactor electroquímico depende directamente de una fuente de energía externa y principalmente por la falta de acceso a los materiales necesarios para poder fabricar las láminas que forman el ánodo, que son de una aleación de titanio e iridio, que se debería fabricar expresamente y es de muy difícil acceso.

Los filtros retienen partículas de tamaños desde 10mm hasta bacterias de 10-3 mm. Depende del tamaño de la porosidad de las partículas estas quedan retenidas en él y sin son más pequeñas traspasarán los poros del filtro y serán removidas por el torrente del afluente.

Los filtros se pueden clasificar según la siguiente tabla:

Tabla 14. Características de las propiedades de las unidades de filtrado. Vía: Universidad de Perú, 2011.

Parámetro	Características
Lecho Filtrante	Simple (arena o antracita) y lechos dobles o múltiples
Sentido del flujo	Descendente, ascendente y ascendente-descendente.

Forma de aplicar la carga de agua	Por gravedad y a presión.
Forma de control operacional	Tasa constante y nivel variable, tasa constante y nivel constante y tasa declinante.

Los factores que influyen en la filtración son:

Tabla 15. Características de los factores que influyen en el filtrado. Vía: Universidad de Perú, 2011.

Factor	Características
Características de la suspensión	Tipo, tamaño, densidad, dureza o resistencia de las partículas suspendidas (flóculos), temperatura del agua por filtrar y concentración de partículas suspendidas en el afluente.
Características del medio filtrante	Tipo, granulometría, peso específico del material filtrante y espesor de la capa filtrante.
Características hidráulicas	Tasa de filtración, carga hidráulica disponible para la filtración, método de control de los filtros y calidad del efluente.

Para el diseño del proyecto las características del filtrado son:

- Lechos múltiples para separar los sólidos en suspensión según sus características hasta la última etapa que será la desinfección.
- Flujo descendente para aplicar la carga sobre el filtro por gravedad minimizando la carga a presión que requeriría de una bomba de impulsión ayudada con energía eléctrica.
- Tasa constante de nivel variable para minimizar la regulación del sistema con valvulería adicional.

Los sólidos en suspensión (no incluyendo bacterias, virus, protozoos...) que se deben eliminar del efluente son los siguientes:

- Pentóxido de fósforo (P_2O_5)
- Óxido de potasio (K_2O)
- Óxido de calcio (CaO)
- Nitrógeno
- Carbono
- Materia Orgánica (en largas cadenas de carbono como proteínas e hidratos de carbono).

Debido a que no se disponen datos experimentales para este proyecto de los sólidos en suspensión que hay en la orina y el agua fecal, se dimensionara el sistema yendo a máximos para eliminar cualquier tipo de sólidos en suspensión exceptuando los patógenos que se eliminaran en la etapa de desinfección.

El filtrado se realizará en distintas etapas. Diseñado para filtrado para eliminar los sólidos de mayor a menor tamaño en cada etapa. Las etapas de filtrado propuestas se basan siguiendo diseños de empresas que depuran y potabilizan los lixiviados de residuos no

reciclables y de aguas residuales, como son GBI Grup en su centro de tratamiento de residuos de Lloret de Mar y Telwelssa con su planta de tratamiento de lixiviados autocontenida.

La propuesta para la filtración del efluente es la siguiente:

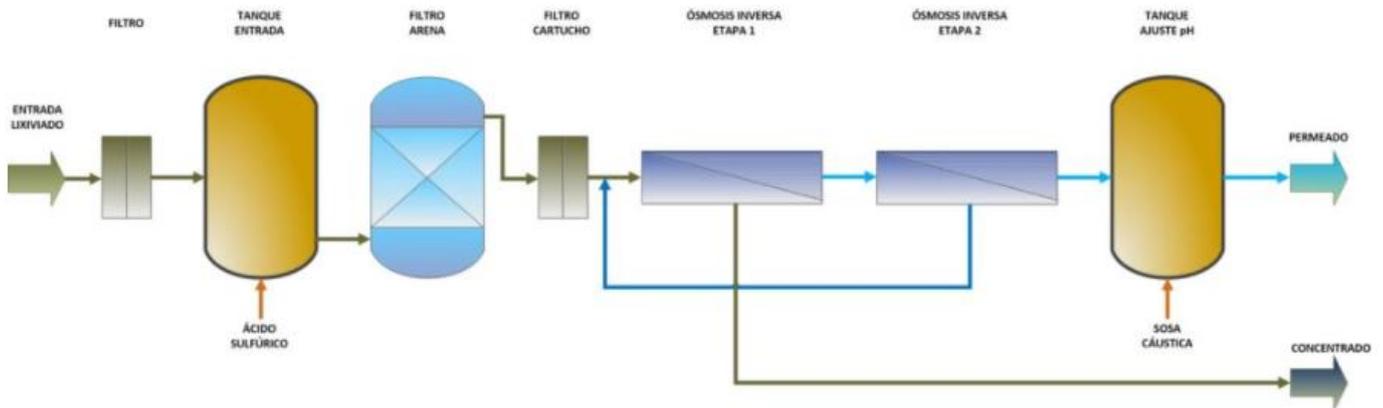


Figura 20: Esquema de proceso para filtración de lixiviados. Vía: www.telwesa.com

1. Filtro de barrido: Este es un filtro de malla que elimina los sólidos suspendidos de máximo tamaño, esta malla suele ser típicamente de 100-110 μm pero puede llegar a ser de hasta 400 μm , que pueden ser orgánicos como semillas o pequeños granos de arena que pueden ser visibles al ojo humano.
2. Filtro de arena: es una tecnología muy antigua. Consiste en unos lechos, camas de arena o material granular, en este las partículas se separan físicamente del agua por la propia filtración, después con estos sólidos extraídos se produce una etapa de absorción química en que los contaminantes pegados a la arena producen un crecimiento biológico que esté posteriormente consumen los nutrientes del agua contaminada. (Lesikar, 2000). Los filtros de arena se usan principalmente para contaminantes con cargas bajas o medianas, como pretratamiento, y son capaces de filtrar partículas de hasta 20 μm . (Sanchez, 2017).
3. Filtro de cartucho: los filtros de cartucho son unos microfiltros finos formados por fibras de algún tipo de plástico que se instalan alrededor de un tubo central para formar un cartucho estándar. El funcionamiento de estos filtros es puramente de filtrado por arrastre, donde las partículas en suspensión son atrapadas por el filtro. Estos filtros suelen atrapar partículas de entre 0,1 hasta 20 μm .
4. Filtro de carbón activo: los filtros de carbón activado son unos filtros que son capaces de extraer las partículas en suspensión más pesadas del agua como el cloro. Los filtros de carbón activado consisten en pasar el agua a través de unas láminas de carbón activado, este es un material muy poroso con una granulometría de entre 0,2 y 0,8 nm (Cruz, 2016) que se obtiene a partir de carbón vegetal o una materia vegetal similar que se somete primero a una etapa de pirólisis (calentamiento si oxígeno) y posteriormente se produce la activación de este con una exposición a temperaturas muy elevadas con activadores como sales o ácidos (Tuawa, 2020).

La filtración del diseño se realiza en distintas etapas, debido a que dentro del efluente se encuentran partículas como pequeños trozos de heces que pueden tener un tamaño de entre 1 y 10 mm hasta sales disueltas como la urea que pueden tener un tamaño nanométrico y si se usara solo un filtro de una porosidad muy elevada que sería el filtro de carbón activo de este diseño este tendría una pérdida de carga muy elevada y quedaría saturado en pocos ciclos, por esto se propone eliminar los sólidos suspendidos por rangos de tamaño.

El filtro de carbón activado es la alternativa que se propone a la ósmosis en 2 etapas que se propone en el diseño de este proyecto frente el diseño de Ósmosis inversa que realiza Telwelsa, esto debido a que la ósmosis inversa requiere de una instalación más compleja y de un aporte de energía y de sales constante para poder realizarse frente a los filtros de carbón activado, que a pesar de tener una disponibilidad más baja en el ámbito local del proyecto, son de instalación más sencillos y no requieren de un aporte de energía externa.

Del diseño inicial se elimina el tanque de entrada donde se introducen ciertas cantidades de ácido sulfúrico para producir la desinfección del agua ya que esta se produce finalmente por choque térmico. La etapa de ajuste de pH del agua se deja fuera del estudio, pero se considera que es necesaria ya que el pH tanto de las heces como de la orina es básico estando entre 7-9, por lo que esta etapa se debe de introducir una cierta cantidad de ácido para neutralizar consiguiendo un pH neutro.

6.1.1.6 Selección del proceso de desinfección

Para la desinfección para este diseño se prioriza el choque térmico para poder aprovechar el calor que excede de la combustión. El calor mínimo del intervalo del que se dispone es el sobrante que queda después de la evaporación:

$$Q = 70.795,00kJ - 24.775,31kJ = 40.019,69kJ$$

Para evaluar si puede ser utilizable este calor se estudia el calor necesario que se requiere para la desinfección. Para ello se hacen las mismas hipótesis que en la selección del secado del punto 3. Además:

- Para la densidad del agua fecal y la orina se considera como agua, con un valor de 1000 kg/m³.

La cantidad de agua pendiente de potabilizar de la suma del efluente producido por el reactor anaerobio, que es la orina humana, y la del agua extraída del lodo en la fase de evaporación. Siendo esta de:

$$m = 69,50kg$$

Con la cantidad efluente se calcula el calor necesario para elevar su temperatura hasta 70°C garantizando la desinfección por choque térmico:

$$Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T$$

Donde:

- Cp (Calor Especifico): 4,182kJ/kg·°C
- hv (Entalpía de vaporización): 2.257kJ/kg
- m (masa): 69,50 kg
- ΔT (incremento de temperatura): 50°C

Así el calor necesario para producir el choque térmico es de:

$$Q = 14.532,45kJ$$

Después de calcular el calor necesario para producir choque térmico en el agua recuperada se determina que el proceso es viable y aún dejaría una cantidad importante de calor aprovechable.

6.1.2 Esquema del diseño seleccionado

Una vez evaluadas las alternativas el diagrama de proceso definitivo es el siguiente:

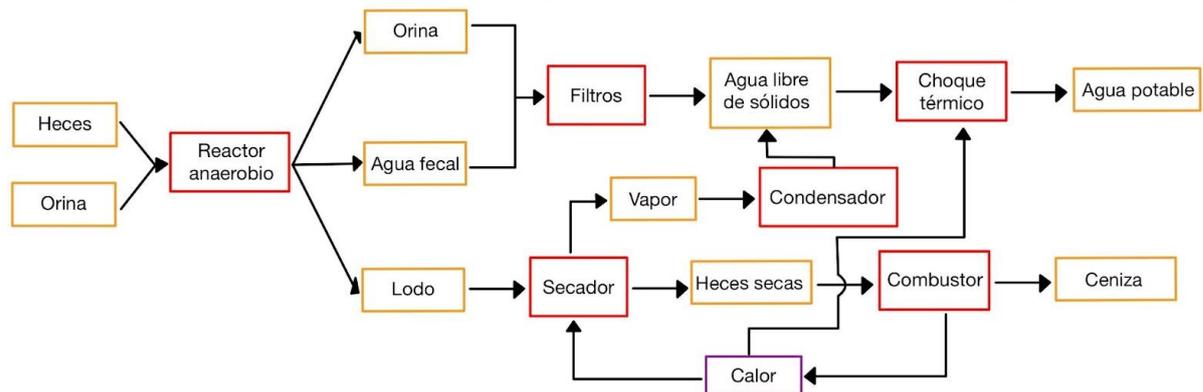


Figura 21: Esquema de proceso del diseño seleccionado. Vía: propia

El diseño recolecta las heces y la orina directamente dentro del reactor anaerobio después de su producción. Las heces y orina entran dentro de un reactor anaerobio de lecho entre deflectores. Dentro de él las heces se mezclan en un lodo, que va reaccionado con la fase líquida y se degrada reduciendo una parte su volumen sólido, así como los patógenos contenidos en él. Después se separan las fases líquidas y sólidas.

El lodo pasa a estar dentro de un secador en el que se elimina la humedad contenida en él. Esta humedad es condensada y recuperada para su posterior uso. Después las heces secas que se obtienen pasan dentro de un combustible en el que se combustionan las heces para producir energía calorífica. Esta es aprovechada para alimentar el secador y la etapa de desinfección. Obteniendo finalmente unas cenizas que son totalmente estables y no tienen ningún riesgo de patógenos contenidos que pueden ser utilizados como fertilizantes.

La orina y el agua fecal que se obtienen del reactor anaerobio, son pasadas por una etapa de filtrado para eliminar los sólidos en suspensión que contienen. Después de ello se acumulan dentro de un depósito que recibirá el calor recuperado de la combustión de las heces para elevar el agua hasta 70°C para eliminar los patógenos contenidos.

6.2 Balance de masas del sistema

A continuación, se detalla el balance de masas del sistema definitivo definido según el esquema del apartado anterior 3.1.2.

El balance de masas se presenta por etapas de cada bloque del esquema de la figura 3.5, mostrando el componente, cantidad y fase física en la entrada del bloque y en su salida. Este balance de masas será para un ciclo de uso dimensionado para el uso de 50 personas.

Primero se parte de la siguiente cantidad inicial:

$$\text{Cantidad de heces iniciales} = 0,25 \text{ kg/día} \cdot 50 \text{ pers} = 12,5 \text{ kg}$$

$$\text{Cantidad de orina inicial} = 1,25 \text{ l/día} \cdot 50 \text{ pers} = 62,5 \text{ l} \cdot 1 \text{ l/kg} = 62,5 \text{ kg}$$

El primer bloque que se encuentra es el reactor anaerobio, donde entran las heces y la orina, mezclados para producir una reacción anaerobia que degrada en buena parte los sólidos en suspensión:

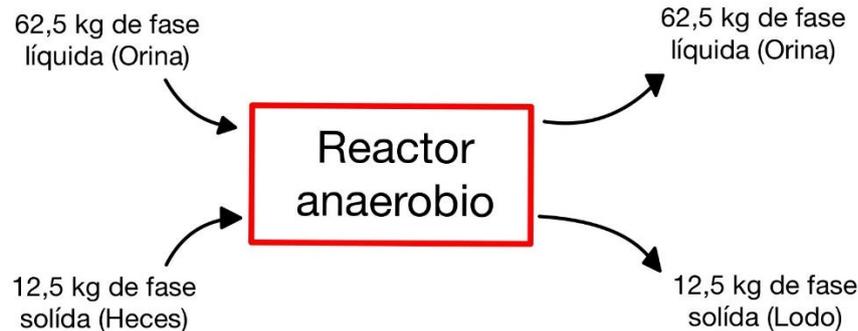


Figura 22: Balance de masas del choque térmico. Vía: propia

En este caso el balance de masas es el mismo en la entrada y salida del reactor, pero la composición cambia, ya que en la fase líquida los sólidos en suspensión se degradan y reducen, así como en las heces se estabilizan y se degrada su materia orgánica reduciendo la DBO.

Después siguiendo la cadena de barros viene la etapa de secado. En ella el lodo se somete a calor y se somete a 100°C para evaporar la fase líquida:

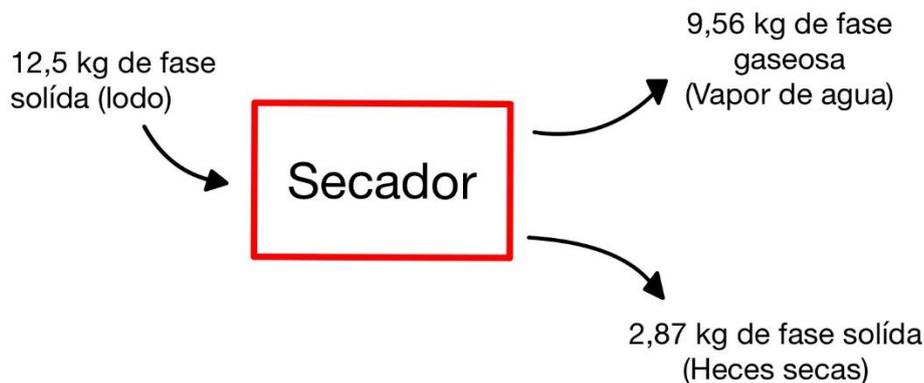


Figura 23: Balance de masas del secador. Vía: propia

El último bloque de la cadena de sólidos es el combustor se establece que el 85,39% es materia volátil que se perderán como gases de la combustión y el 14,56% es ceniza (Onabanjo et al. 2016). La composición química de los gases se compondrá principalmente de CO₂ y H₂O, pero la composición exacta y la estequiometría de la relación se deja pendiente para futuras fases del proyecto.

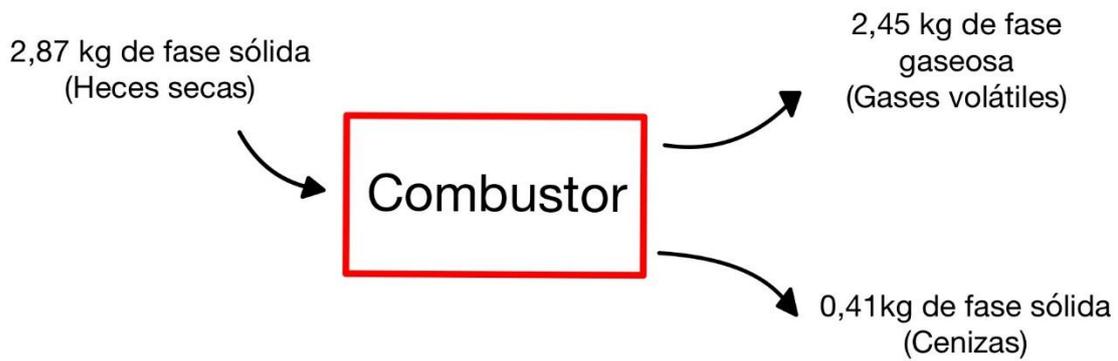


Figura 24: Balance de masas del combustor. Vía: propia

Ahora siguiendo la línea de líquidos se parte de inicialmente el efluente que es una mezcla principalmente de orina y agua fecal con sólidos en suspensión. Este efluente pasa el filtrado que elimina los sólidos en suspensión. Dado que en esta etapa no se pueden cuantificar los sólidos disueltos ni su tamaño, pero se sabe que son un porcentaje en masa muy bajo, la masa de estos se considera despreciable y la entrada y salida de masa es la misma, pero de composición distinta.



Figura 25: Balance de masas del filtrado. Vía: propia

Después de esta etapa se produce la etapa del choque térmico, antes se produce la condensación del agua evaporada del secado de las heces humanas, que se añade al agua que se producirá el choque térmico.

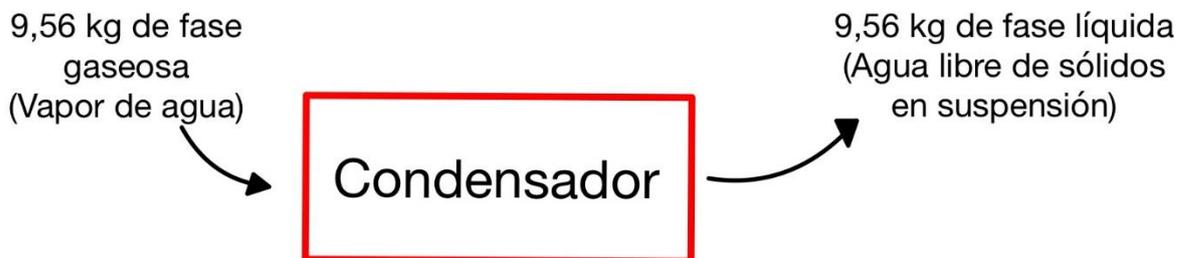


Figura 26: Balance de masas del condensador. Vía: propia

Una vez esta agua se adiciona a la proveniente del agua de filtración se produce el choque térmico para la desinfección de esta como última etapa.

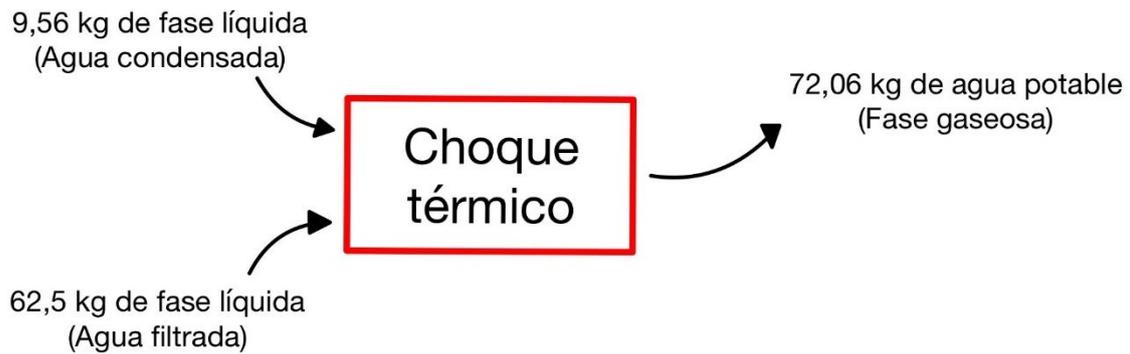


Figura 27: Balance de masas del choque térmico. Vía: propia

Una vez realizados todos los balances de masas, se obtienen todos los productos finales que daría el sistema:

- 72,06 kg de agua potable.
- 2,45 kg de gases volátiles.
- 0,41 kg de ceniza.

Y sabiendo los productos de entrada:

- 12,5 kg de heces.
- 62,5 kg de orina.

El sumatorio de las masas de entrada debe coincidir con el sumatorio de las masas de los productos de salida.

$$\begin{aligned} \sum m_{entrada} &= \sum m_{salida} \\ 12,50 \text{ kg} + 62,50 \text{ kg} &= 72,06 \text{ kg} + 2,45 \text{ kg} + 0,41 \text{ kg} \\ 75,00 \text{ kg} &= 74,91 \text{ kg} \end{aligned}$$

Se observa que el balance de masa coincide a pesar de una diferencia de 0,08 kg que es un error del 0,12% que se puede considerar despreciable que se considera por error de decimales o por las referencias experimentales que se han cogido de otros sistemas.

6.3 Dimensionamiento del sistema

Para poder dimensionar el sistema para este proyecto se hacen las siguientes suposiciones:

- El sistema lo usarán una media de 50 personas al día.
- La generación de excrementos y la gestión de estos será según el balance de masas del apartado 3.2
- El ciclo de secado y combustión de las heces humanas se llevará a cabo una vez al día una vez se llene el reactor anaerobio.

De este dimensionamiento se excluye la parte del condensador debido a la falta de datos experimentales de la producción de vapor de agua para poder dimensionarlo.

6.3.1 Dimensionamiento del reactor anaerobio

El reactor anaerobio tiene que ser diseñado para contener las heces humanas y la orina para 50 personas. Para ello se estiman las densidades y se calcula el volumen de estas para saber el volumen que debe tener este.

- Densidad de la orina (ρ_{orina}): se supone igual a la del agua que es de $1000 \frac{kg}{m^3}$
- Densidad de las heces (ρ_{heces}): la densidad de las heces humanas se caracteriza en $1.060 \frac{kg}{m^3}$ (Penn et al, 2018).

Así el volumen de las heces y orina por una persona es de:

$$V = \frac{12,5kg}{1.060 \frac{kg}{m^3}} + \frac{62,5kg}{1.000 \frac{kg}{m^3}} = 0,0743m^3 = 74,3L$$

Este reactor tiene que contener un mínimo de 3 deflectores, para garantizar un buen funcionamiento, siendo la primera etapa del 50% del volumen y las otras 3 repartidas en partes iguales, conteniendo cada una 16,5% del volumen cada uno y donde se incorporan los filtros de grava.

Para volumen de todo el depósito se definen 100L en esta fase inicial del diseño, quedando pendiente estudiar la evacuación de gases que se puedan producir y la disolución de los sólidos en suspensión que se definen.

6.3.2 Dimensionamiento del secador

El secador tiene que ser similar a una olla o caldero, de metal que permite transmitir el calor y retenerlo para mantener la temperatura a 100°C. En su parte superior, en la parte más alta tiene que permitir el paso del vapor de agua para que pase hasta el condensador para posterior condensación. El volumen mínimo que debe tener es el necesario para contener las heces, su base circular debe tener un diámetro en que el lodo extendido no tenga un espesor mayor de 5 cm para favorecer la velocidad de ebullición.

Así primero se calcula el volumen del lodo y después se estimará el diámetro del secador sabiendo la altura que puede tener el lodo.

El volumen del lodo se calcula a partir de la densidad del lodo que es de $550 \frac{kg}{m^3}$ ($500 \frac{kg}{m^3} - 600 \frac{kg}{m^3}$) (Ministerio de Fomento, 2021). Así el volumen es:

$$V = \frac{12,5kg}{550 \frac{kg}{m^3}} = 0,023m^3 = 23L$$

Una vez sabiendo el volumen que ocupa el lodo se para calcular el diámetro de la base del secador:

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot h}} = \sqrt{\frac{0,023}{\pi \cdot 0,05}} = 0,38m = 38,6cm \rightarrow D = 77,2cm$$

Después para la parte superior se proponen que sea cónica concéntrica y en la punta del cono iría la salida del vapor de agua al condensador. Se deja para futuras fases de diseño evaluar el ángulo y altura del cono para favorecer la salida del vapor.

En cuanto a materiales su base debe ser de aluminio, que tiene una conductividad de aluminio muy elevada ($237 \frac{W}{k \cdot m}$).

La base irá colocada directamente sobre el combustor, para aprovechar el calor del combustor directamente sin conductores de calor intermedios y simplificar el producto.

6.3.3 Dimensionamiento del secador

Debido a la falta de disponibilidad de información para el analizar la combustión de las heces al ser materia orgánica seca se tratará como si fuera biomasa y el dimensionamiento del combustor se hará como si fuera para quemar biomasa.

La combustión directa que se produce es un proceso en el que la materia de las heces secas es oxidada a altas temperaturas (600°C - 1000°C) hasta convertirse principalmente en dióxido de carbono y agua. El proceso consta de dos etapas previas a la combustión, una inicial de pirólisis y otra de gasificación (Carrasco, 2007).

En las principales tecnologías de combustión de biomasa destacan tres tipos de combustibles: de lecho fijo, de lecho fluidizado y de combustible pulverizado. Estas se caracterizan por el estado y comportamiento físico del biocombustible, para el tipo de combustible de este diseño que se trata de una biomasa sólida, se debe seleccionar un combustor de lecho fijo.

El combustor de lecho fijo se caracteriza por tener hornos con parrillas y alimentadores. La biomasa se ubica en las parrillas y se produce una primera etapa de quemado. La biomasa libera unos gases combustibles que son quemados después por la adición de aire secundario (Van-Loo, 2008).

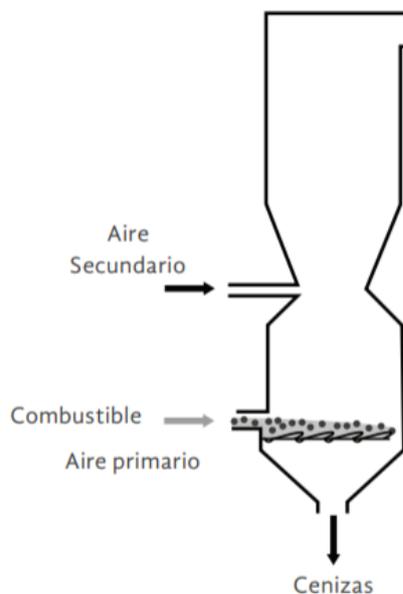


Figura 28: Esquema básico de combustor de lecho fijo. Via: Van-Loo (2008).

Seleccionado el tipo de combustor, se determina el tipo de parrillas que debe tener, pudiendo ser: parrillas fijas, movedizas, viajeras rotatorias y vibratorias. Las características de estas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 16. Características tipos de parrillas en combustores de lecho fijo. Vía: Barrera, J. et al., 2018.

Tecnología de lecho fijo	Descripción	Ventajas	Desventajas
Parrillas viajeras	Corresponden a los sistemas que incorporan barras paralelas que forman una banda sinfín que se mueve a través de la cámara de combustión.	<ul style="list-style-type: none"> ·Condiciones homogéneas ·Baja emisión de hollín. 	<ul style="list-style-type: none"> ·Mayor cantidad de aire primario ·Requieren mecanismos de alimentación.
Parrillas móviles inclinadas	Estos sistemas tienen una parrilla inclinada que consta de barras fijas y móviles, en los cuales se alternan movimientos horizontales hacia adelante y hacia atrás de las secciones removibles, transportando el combustible a lo largo de la parrilla.	<ul style="list-style-type: none"> ·Permiten graduar velocidades para ajustar a etapas de combustión. ·Permiten usar una gran variedad de biomassa 	<ul style="list-style-type: none"> ·Presentan complicaciones en el ajuste de velocidades, lo que genera una alta presencia de inquemados. ·Se recomiendan para biomassas secas o con bajo nivel de fusión de cenizas.
Parrillas móviles horizontales	Este sistema tiene una cama de combustible completamente horizontal; esto se logra disponiendo de las parrillas de forma diagonal.	<ul style="list-style-type: none"> ·Evita movimientos incontrolados por efecto de la gravedad. ·Distribuyen de manera homogénea el combustible, lo que evita los puntos calientes. ·Reducen la altura promedio de la caldera. 	<ul style="list-style-type: none"> ·Requieren precarga de biomasa al inicio de la operación; esto evita que haya un espacio libre entre las barras.
Parrillas Vibratorias	Este sistema consiste en una pared de tubos con aletas inclinadas colocados sobre resortes.	<ul style="list-style-type: none"> ·Se inhibe la formación de escorias en la parrilla ·Ideales para biomasa con altas concentraciones de cenizas. 	<ul style="list-style-type: none"> ·Altas emisiones de cenizas causadas por la vibración. ·Altas emisiones de CO por los disturbios, lo que no fomenta la combustión completa.
Parrilla giratoria subalimentada	Se utilizan unas parrillas cónicas que rotan en direcciones opuestas en las cuales se suministra el aire primario por la parte inferior. Como resultado, el combustible quemado y el combustible húmedo son bien mezclados.	<ul style="list-style-type: none"> ·Ideal para biomassas muy húmedas. ·Capacidad entre 3 y 17 MW en caso de contar con cogeneración, puede estar entre 1-4,5MW. 	<ul style="list-style-type: none"> ·Requiere un tamaño de partícula promedio por debajo de los 50 mm.
Calderas con subalimentador	La alimentación se da en la parte inferior por medio de tornillos sinfín o bandas transportadoras.	<ul style="list-style-type: none"> ·Seguras y de operación económica. ·Operación flexible y fácil remoción de cenizas. ·Ideales para biomasa con bajo contenido de ceniza. ·Requieren un nivel bajo de control. 	<ul style="list-style-type: none"> ·Requieren un tamaño de partícula promedio por debajo de los 50 mm ·Apelmazamientos de ceniza pueden causar problemas en la alimentación

Viendo los puntos más importantes de las distintas parrillas se selecciona que las parrillas del combustor sean parrillas horizontales. Inicialmente se descarta que sean parrillas giratorias subalimentadas, ya que la biomasa del diseño tiene una etapa previa de secado total y no es muy húmeda, así también todos los combustores con subalimentado. Las parrillas vibratorias también se eliminan debido a que tienen alta emisión de CO y la biomasa del diseño no tiene una elevada generación de cenizas. De las 3 opciones restantes, se elimina como posibilidad las parrillas viajeras debido a que necesitan un elemento intermedio de alimentación, que es contrario a los criterios de diseño del proyecto de simplificar al máximo el diseño. Finalmente, de las dos últimas opciones, se selecciona el uso de parrillas horizontales debido que requieren menos control por parte del usuario y se considera como el más sencillo de todos, además de minimizar el tamaño del equipo y que permite evitar una etapa de peletización de la biomasa.

Para garantizar una buena combustión se debe determinar el flujo de los gases de combustión y la aportación de aire exterior. Así para este diseño se determina que debe de ser un flujo en corriente. En él los gases de la combustión están en la misma dirección que las llamas. Este sistema se usa para combustibles secos, como el de este diseño, que permite incrementar el tiempo de residencia de los gases y permite reducir las emisiones de NO_x (Van-Loo, 2008). El esquema de diseño sería similar al de la figura 27:

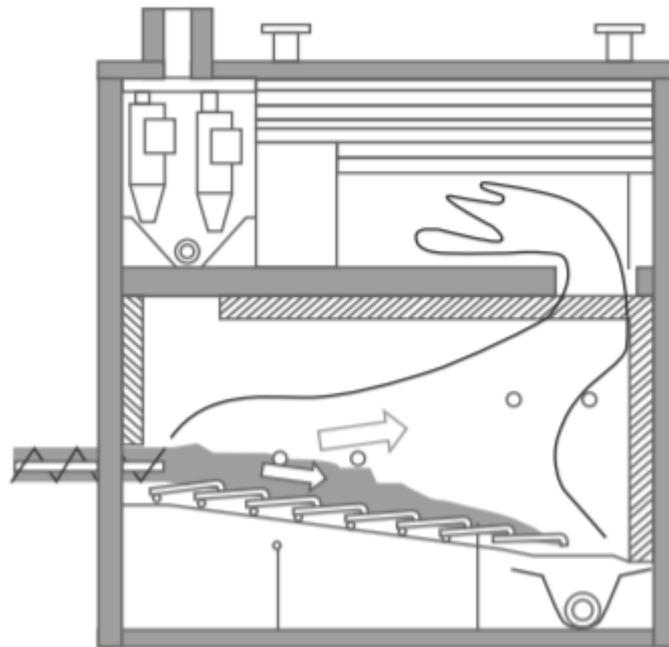


Figura 29: Esquema de combustor de lecho fijo con parrillas horizontales y flujo ascendente. Vía: Carrasco-Venegas (2013).

La cantidad de aire primario que se debe aportar debe ser entre 10 L/min y 18L/min variando según la temperatura de pico que se desee alcanzar, recomendando según la tabla 3.6, una cantidad de aire próxima a los 10 L/min que se consigue un mayor rendimiento de la combustión:

Tabla 17. Características de la combustión en función de su aportación de aire externo. Vía: Barrera, J. et al., 2018.

Flujo volumétrico de aire (L/min)	Temperatura pico de combustión (°C)	MCEE (%)	η CCE (%)	Tasa de consumo de combustible (g/min)
18	558	73	55	2,30
16	542	83	63	1,99
14	547	87	68	2,02
12	431	87	57	1,91
10	435	89	82	1,53

Así el diseño del combustor sería similar al presentado a continuación:

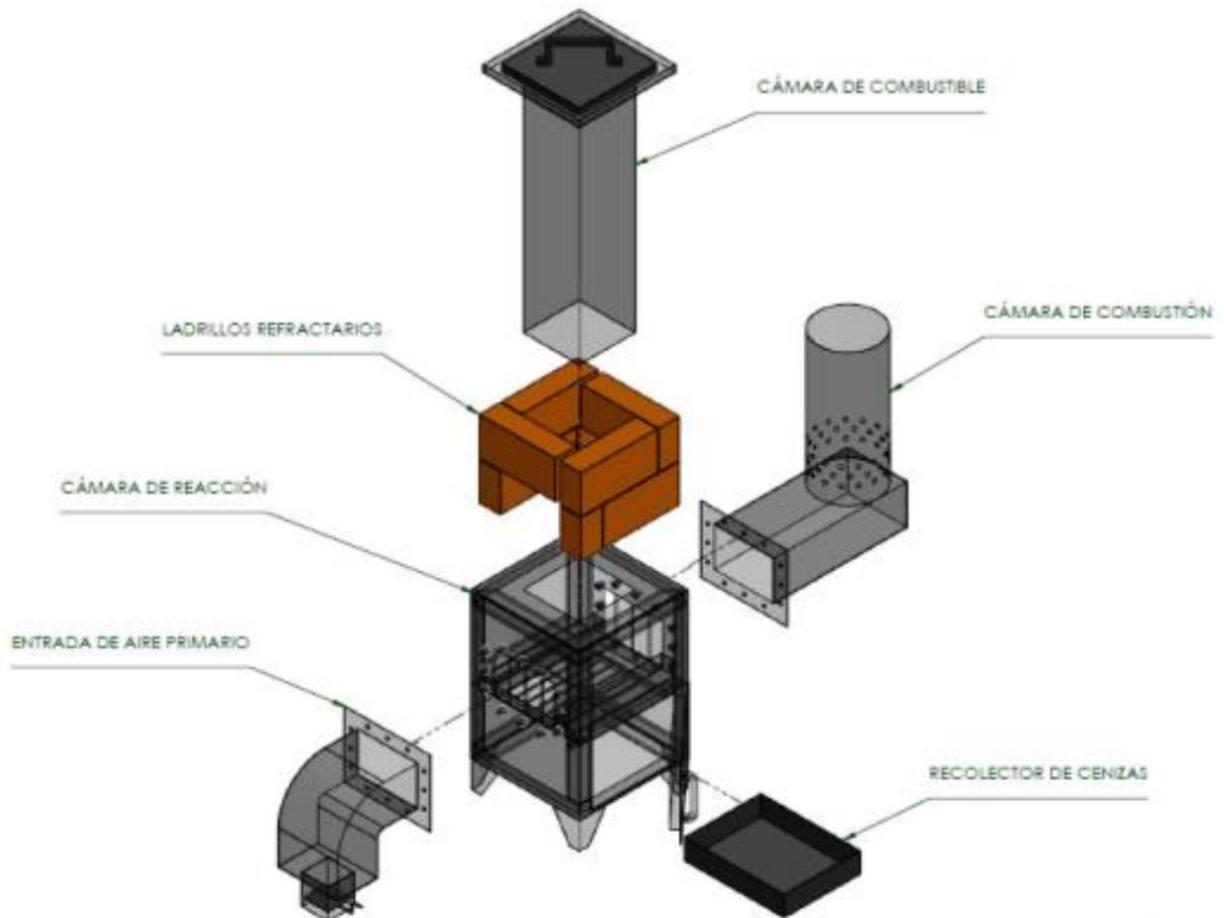


Figura 30: Esquema de combustor de lecho fijo con parrillas horizontales y flujo ascendente. Vía: Carrasco-Venegas (2013).

Por último, se debe diseñar la potencia necesaria para la ignición de la combustión. Esta se produce desde una fuente de energía eléctrica que vendrá dada desde el diseño de las fuentes de energías renovables. La biomasa que se deposita inicialmente sobre la rejilla se calienta mediante transferencia de calor por el suministro de aire precalentado de un encendedor de aire, la biomasa absorbe la temperatura por convección hasta producirse la combustión y este suministro se apaga (Rein G, 2009).

La potencia en la que se necesita para elevar la temperatura se calcula a partir de los gráficos del Anexo I, apartado 7. En las gráficas se ve en la primera una relación de temperatura y tiempo. La línea azul marca el calor del aire que suministra y la roja la temperatura interna del combustor. Esta parte de 100°C y se tiene que suministrar aire a 500°C hasta que se produzca la suficiente temperatura interna de 300°C durante 500s aproximadamente. Así se procede a calcular la potencia necesaria para el encendido. Para ello se presuponen las siguientes hipótesis:

- Sistema totalmente adiabático.
- Presión atmosférica.
- Fluido y flujo incompresible.
- Temperatura de partida de 100°C, según gráficas en Anexo I, apartado 7.
- Se supone un caudal de 12 L/min ($2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$).

Así la potencia necesaria para que el sistema pueda alcanzar esta temperatura es de:

$$P_{ignitor} = \rho_{aire} \cdot C_{p_{aire}} \cdot Q_{aire} \cdot \Delta T = 97,28W \approx 100W$$

Donde:

- ρ_{aire} (Densidad del aire) = 1,21 kg/m³
- $C_{p_{aire}}$ (Calor específico del aire) = 1005 J/kg·°C
- Q_{aire} (Caudal del aire) = $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$
- ΔT (Variación de temperatura) = 400°C

La potencia de la energía se redondea a 100W para facilidad en cuanto a disponibilidad de productos ya fabricados. Esta potencia debe garantizarse a lo largo de 500s.

Finalmente, los requerimientos del combustor serán:

- Combustor de lecho fijo con parrillas horizontales
- Aportación de aire exterior de entre 18 L/min y 10 L/min.
- Encendedor de 100W por aire durante un tiempo de 500s

Se deja pendiente de estudio y análisis para futuras fases de desarrollo:

- Dimensiones de la cámara de combustión.
- Evaluación de la alimentación del combustor.
- Efecto de la peletización de la biomasa sobre el rendimiento de la combustión.
- Análisis de alternativas y dimensionado para el encendido de la combustión.

6.3.4 Dimensionamiento del filtrado

Para dimensionar el filtrado se debe seleccionar el caudal que se quiere tener del proceso. Para ello se estimará a partir del volumen inicial y el tiempo deseado que se quiere para poder hacer este proceso. Siguiendo la siguiente ecuación, que es la definición propia del caudal volumétrico:

$$Q = \frac{V_{inicial}}{t_{duración\ filtrado}}$$

El tiempo de duración del ciclo se define que debe ser de 7h, para que el bombeo eléctrico pueda usarse en las máximas horas de sol posibles, ya que este debe alimentarse de energía solar fotovoltaica. Que será de 10.00h de la mañana a 17.00h. que es cuando se consigue la mayor irradiación solar en Tanzania según el gráfico de la figura 29 que muestra la radiación media a lo largo del día de distintas estaciones:

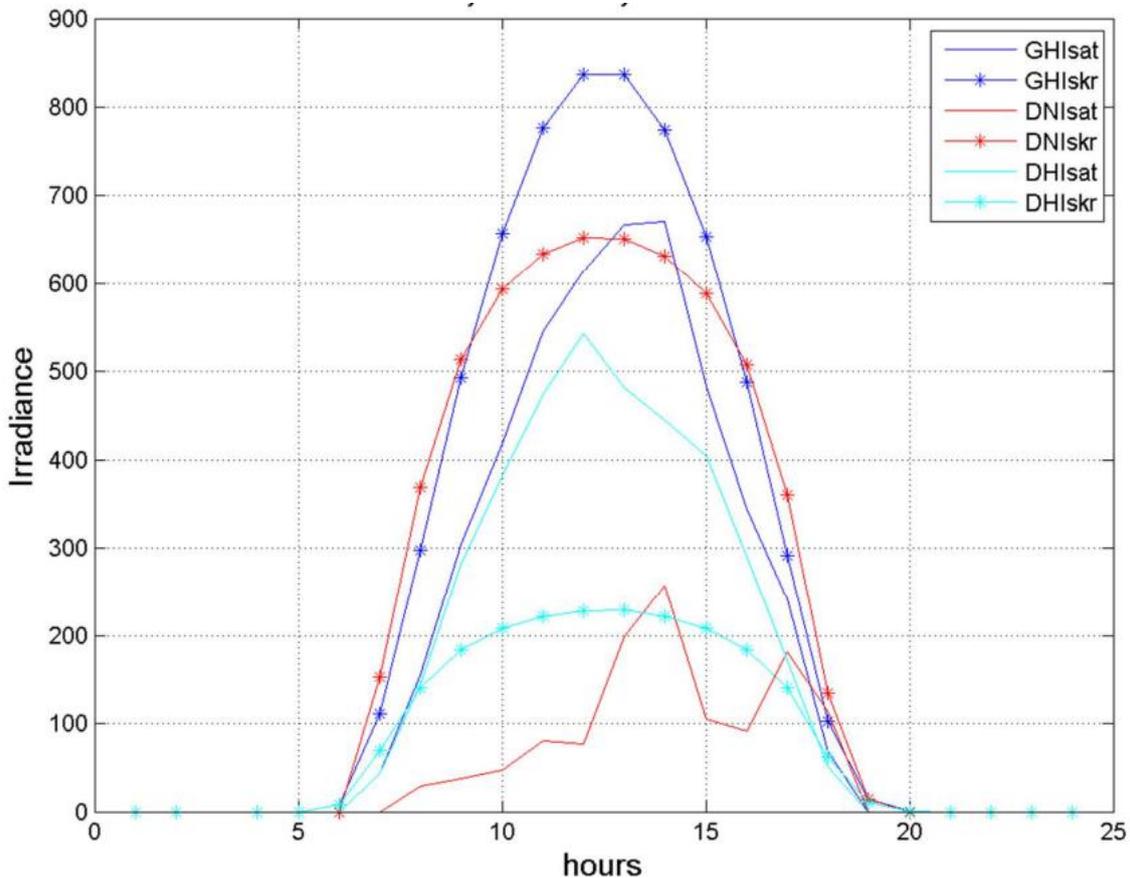


Figura 31: Gráfico de la irradiación solar en función de las horas del día. Vía: Bernardos et al (2015).

El volumen inicial viene dado del apartado 3.2 del balance inicial del sistema que es de 62,5 kg de efluente y dada que la densidad que se estima es como la del agua (1000 kg/m³) el volumen es de 62,5m³. La presión del circuito de efluente tendrá que ser de 4 bar ya que se usarán equipos que se puedan integrar en redes de agua pública de abastecimiento de agua y esta es la presión de servicio de este tipo de circuitos según norma UNE-EN 805:2000.

Así el caudal obtenido para el sistema del filtrado es de 8,93m³/a este caudal se le aplica un factor de seguridad del 20% para que el sistema pueda tener más margen en caso de necesitar alguna recirculación en alguna etapa.

Después se determina la porosidad que debe tener cada filtro y sus especificaciones principales para poder finalmente calcular la pérdida de carga que provoca cada etapa del filtrado.

1. Filtro de barrido: el filtro de barrido se determina que sea un filtro de malla de acero inoxidable autolimpiable con una porosidad de partículas de 100 μm, que se

determina de este ya que los sólidos suspendidos pueden ser pequeñas arenas, semillas fibras que puedan salir de las heces y se mezclen con el efluente. La pérdida de carga típica de estos filtros es constante, por ser autolimpiable, y es de 0,5 bar (Coopersa, 2018).

2. Filtro de arena: el filtro de arena debe ser de filtración lenta para que pueda producirse una degradación anaeróbica por parte de la microbiología desarrollada en el lecho filtrante, y para ello la tasa de filtrado debe ser de 5 a 8m³/(m²·dia). Por ello el sistema se tiene que producir en redundancia, pero esta y las posibles alternativas se dejan para futuras etapas del diseño.

El flujo debe de ser descendente, por ello la entrada de efluente será en la parte superior y la salida en la parte más baja del contenedor del filtro para que el agua atraviese las distintas capas de arena.

Las capas que debe de contener el lecho filtrante según manual de construcción elaborado por LLanos Angeles et al. en 2018 son:

- 15cm de grava con tamaño de 19 a 50mm.
- 5 cm con grava de 9,5 mm a 19mm.
- 5 cm con grava de 3 a 9,5 mm.
- 5 cm con grava de 3 a 9,5 mm.

Las pérdidas de carga de esta parte se deben medir en futuras etapas de forma empírica, pero para esta etapa se estiman del siguiente gráfico de filtros de arena de fabricación industrial:

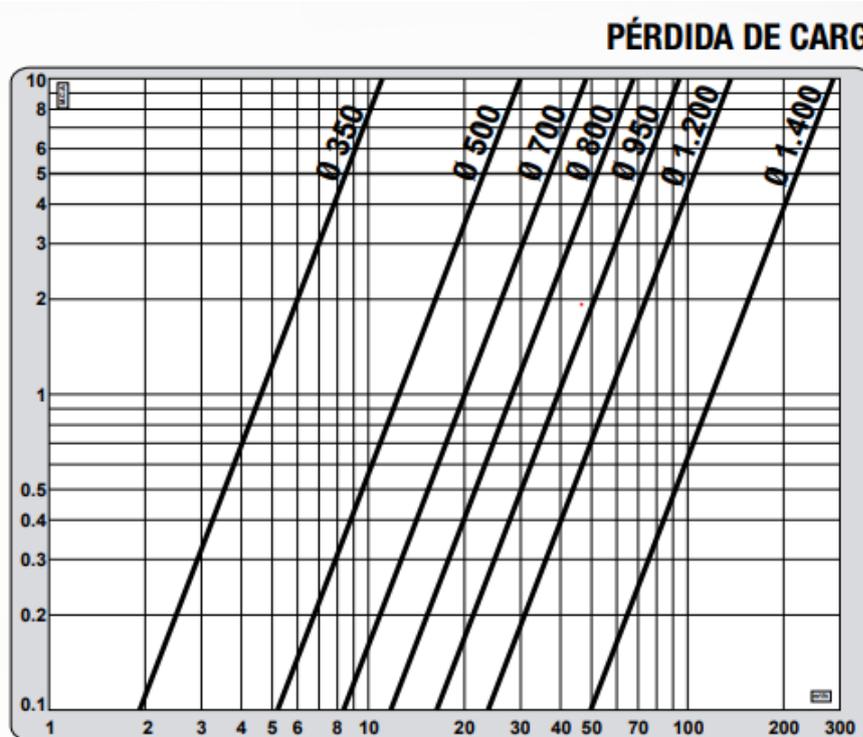


Figura 32: Gráfica de las pérdidas de carga en función de la conexión y caudal. Vía: www.lama.es

La sección se escoge entre 500 mm y 700 mm y se selecciona la de 500 mm para ponerse en el peor escenario y se obtiene una pérdida de carga de 0,5 bar.

3. Filtro de cartucho: el filtro de cartucho debe venir prefabricado ya que debe realizarse de fibras de plástico enmallados que den un tamaño de porosidad nominal de 1 a 25 μm colocadas en un tubo central. Según criterios de diseño del proyecto, estos materiales deben ser de la máxima disponibilidad para facilitar el acceso, por lo tanto se seleccionan que sean de polipropileno hilado enrollado, instalados a presión horizontal, y con un tamaño de 5 μm de eliminación de partículas que es el más utilizado del mercado con una caída típica de presión de 0,2 bar (Bqua, 2019).
4. Filtro de carbón activado: esta parte debe ser la encargada de filtrar y eliminar las partículas que tienen más relación con el calor, sabor y olor, que son parámetros de turbidez, que pueda contener el agua después del filtrado. Este filtro se prepara previamente para que el carbón tenga una elevada porosidad en una superficie específica de 500 a 1500 m^2/g , que se consigue mediante la activación y está además provoca que el carbón tenga una reactividad particular en que el lecho filtrante es hidrófugo y solo permite reaccionar con los sólidos suspendidos (Yadira Carrillo, 2013). Los parámetros que deben definirse del filtro son:
 - a. Estructura física: esta define el tamaño de los poros que pueden ser: macroporos (500 nm), mesoporos (25 nm) y microporos (1 nm) y el estado de este, la parte nanométrica se excluye del filtrado, ya que se usa típicamente para gases, y el estado debe ser granulado para poder tener un mayor caudal de trabajo en menos superficie reduciendo así la pérdida de carga (Chiclote Gonzales, 2018).
 - b. Tipo de activación: la activación de este filtro debe de ser tipo térmica que es la más común del mercado y por lo tanto se encontrará con mayor facilidad según criterios de diseño.

Así el filtro después de definir los parámetros básicos del mismo para este caudal tendría una pérdida de carga de 0,3 bares quedando pendiente evaluar para futuras etapas del proyecto el tiempo de contacto con el filtro, la recirculación que fuera necesaria para cumplir el tiempo de contacto y el tamaño de los granos del carbón activo.

6.3.5 Dimensionamiento del depósito de potabilización

El depósito de potabilización debe tener una capacidad mínima de 75 L que es el volumen de agua limpia que se puede llegar a extraer, redondeando los 74,91 L del balance de masas. Después de usar el calor de la combustión de las heces para el secado y la potabilización por choque térmico del agua filtrada sigue quedando una importante cantidad de calor para ser usada. Por esto el depósito de potabilización se dimensionará para que pueda captar la máxima agua de lluvia que pueda potabilizar todo el calor sobrante.

El calor sobrante después de los dos procesos mencionados sería de:

$$Q_{\text{sobrante}} = Q_{\text{combustión heces}} - Q_{\text{secado}} - Q_{\text{potabilización}}$$

$$Q_{\text{sobrante}} = 70.795,00\text{kJ} - 24.775,31\text{kJ} - 14.532,45\text{kJ}$$

$$Q_{\text{sobrante}} = 31.487,24\text{kJ}$$

Debido a que es muy difícil o no es posible dimensionar las pérdidas por calor se estima que estas son de un 30%. Así el calor que se dispondría sería de:

$$Q_{disponible} = 31.487,24kJ \cdot 0,7 = 22.041,07kJ$$

Con el calor sobrante se obtiene que el volumen de agua que se puede potabilizar siguiendo las hipótesis usadas en el anterior caso es de:

$$m = V = \frac{Q}{C_p \cdot \Delta T} = 105,4L$$

Donde:

- Cp (Calor Especifico): 4,182kJ/kg·°C
- m (masa): 69,50 kg
- ΔT (incremento de temperatura): 50°C

El agua total que se podrá potabilizar será la suma del agua filtrada y el agua recuperada de lluvia que será de 180,31L. Así el depósito deberá poder albergar la capacidad de 181L.

Debido a que los depósitos a partir de 100L se suelen fabricar cada +50 L el estudiado en el proyecto deberá ser de 200L, aunque nunca se pueda llegar a llenar, para abaratar costes y facilitar su obtención.

En el Anexo I se incluye el plano que muestra el esquema detallado de todo el proceso indicando todo el proceso que debe seguir el efluente y el lodo según se ha ido detallando, y el detalle esquemático que de las capas que debe tener el filtro de arena.

6.4 Dimensionamiento del sistema energético

Para este apartado se estudia los requerimientos de aportación de energía externa de las fuentes de energía renovables que necesita el sistema para poder funcionar y las soluciones con su dimensionamiento inicial para poder aportar la energía que pueda requerir el proceso.

6.4.1 Demanda de energía externa del sistema

Los sistemas que requieren energía a parte de la ya producida por el propio saneamiento son los siguientes:

1. Encendido del combustor
2. Sistema de bombeo para el efluente
3. Monitorización del sistema

Estos tres sistemas requieren de una demanda de energía eléctrica para su funcionamiento y esta vendrá aportada de uno de los sistemas de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables presentados en el apartado 4.

La demanda energética se caracteriza por dos variables, la potencia de pico y la potencia consumida a lo largo de todo el ciclo, y el sistema debe de ser capaz de cumplir los dos requerimientos.

La potencia de pico viene determinada por:

$$\sum P_{instantaneas} = P_{encendido} + P_{bombeo} + P_{control}$$

La potencia del encendido del combustor se sabe que es de 100W que viene determinada del apartado 6.3.3.

La potencia de bombeo se estima a partir del caudal, presión de servicio y pérdidas de carga que se sobredimensionan un 30% determinados en apartado 6.3.4 que son:

$$P_{servicio} = 4bar$$

$$Pérdidas de carga = 0,5bar + 0,5bar + 0,2bar + 0,3bar = 1,5bar$$

$$Q(\text{Caudal Volumétrico}) = 10 \frac{m^3}{h}$$

La potencia de bombeo se calcula siguiendo la siguiente ecuación:

$$P_{bombeo} = \frac{Q \cdot (P_{servicio} + Pérdidas de carga)}{\eta} = 40W$$

Donde

- η = rendimiento; que se supondrá del 70%

El diseño de la parte de electrónica de control del sistema se deja para futuras etapas de diseño del proyecto, pero para poder dimensionar el sistema de generación eléctrica se estima el consumo de energía que pueda tener esta parte a partir del consumo de energía que puede tener una placa base de Arduino, dado que el consumo de energía es del orden de mA y, pudiendo considerarse despreciable, se decide estimar una potencia de 100W para tener margen para futuras ampliaciones que puedan ser necesarias.

Así la potencia de pico que requerirá el diseño sobredimensionado en un 30% es la siguiente:

$$\sum P_{instantaneas} = (100W + 40W + 100W) \cdot 1,3 = 312W$$

6.4.2 Demanda de energía por ciclo

La demanda de consumo total por cada ciclo se estima según las horas de funcionamiento explicadas en el apartado 3.3. Estas son 7h por ciclo, que será el tiempo de funcionamiento 1, pero solo por la parte de electrónica y el bombeo de efluente. La parte del encendido como se explica en el apartado 3.3.3 solo será necesario durante 500s (0,14h), que era el tiempo de funcionamiento 2. Así la demanda de consumo por ciclo del sistema en kWh es:

$$P_{consumida} = (P_{bombeo} + P_{control}) \cdot t_{funcionamiento} + P_{encendido} \cdot t_{funcionamiento 2} = 994Wh$$

6.4.3 Selección de la fuente de energía renovable

La selección de esta fuente se decide a partir de las fuentes explicadas en el apartado 2.5. De esas fuentes solo hay dos que sean aplicables que son la minieólica y la solar fotovoltaica, ya que las otras fuentes no sirven para la producción de energía eléctrica directamente.

La fuente de energía renovable seleccionada es la energía solar fotovoltaica por dos motivos:

- Es una fuente de energía mucho más común en el mercado, ya que está mucho más instaurada en el mercado y tiene un mayor rendimiento frente a la minieólica

(CIEMAT, 2020). Y siguiendo el criterio de diseño del proyecto de tener la mayor disponibilidad de los productos, se considera de mayor acceso la fotovoltaica.

- Después de comparar los datos meteorológicos de radiación solar y viento expuestos en el apartado 2.6 se considera más regular la radiación solar y por lo tanto le da mayor fiabilidad a la fotovoltaica.

6.4.4 Almacenamiento de energía

Después de saber el consumo de energía que se requerirá por ciclo se dimensiona el sistema de almacenamiento de energía eléctrica. Este será de baterías eléctricas, el sistema más común y convencional para almacenar energía eléctrica. Se deja para futuras etapas del diseño la selección del tipo de baterías.

Dado que este sistema debe cubrir la demanda de energía del sistema eléctrico para los días que haya ausencia de radiación solar, primero se estudian los días sin esta que hay a partir de los datos del apartado 2.6.1 de los días de lluvia. De estos se cogerá la media anual que es de 7 días por mes. Dado que estos días no suelen ser consecutivos se considera que seguidos serán un 70% de estos, que será un total de 5 días sin radiación solar.

Así la energía que debe tener el sistema de baterías es la de cubrir la demanda energética para estos 5 días, como el diseño debe realizar un ciclo por día, esta debe de ser para cubrir la demanda de 5 ciclos. Y es la siguiente:

$$P_{baterias} = \text{días de demanda} \cdot P_{consumida \text{ por ciclo}} = 4.970Wh = 4,97kWh$$

6.4.5 Dimensionamiento básico del sistema fotovoltaico

Para el sistema fotovoltaico se definen los siguientes elementos:

1. Paneles solares fotovoltaicos: los paneles fotovoltaicos serán monocristalinos que son los más comunes del mercado. El más común actualmente es con una potencia de pico de 455W a 24V (Itec, 2021). El número de paneles será entre uno y dos, porque con uno ya se cubre la demanda de pico que tiene el sistema de 312W definida en el apartado 3.4.1, pero el sistema debe definir si tiene un excedente de energía suficiente para cargar las baterías al 100% de energía definida en el apartado anterior. Para ello se evalúa la producción de energía diaria para los dos casos particulares durante 7h y analizando si cumple los requerimientos de producción de energía.
 - a. Para una placa fotovoltaica de 455W la potencia producida durante estas 7h de funcionamiento será de:

$$P_{producida} = P_{pico \text{ del panel}} \cdot \text{Horas de producción} = 3.185Wh$$

De la producción diaria se resta la demanda energética que se tendría para que el diseño realice el ciclo diario de depuración para obtener el excedente de energía:

$$\text{Excedente energético} = 3.185Wh - 994Wh = 2.191Wh$$

Una vez obtenido el excedente de energía diario para almacenamiento de energía de la producción de energía solar fotovoltaica se calcula en cuántos días se cargarán las baterías:

$$\text{Días necesarios para carga} = \frac{4.970Wh}{2.191 \frac{Wh}{\text{día}}} = 2,26 \text{ días} \approx 3 \text{ días}$$

Con un panel fotovoltaico sería suficiente para alimentar el sistema y garantizar la carga de las baterías para la redundancia del sistema de energía eléctrica.

Debido a que después de evaluar este primer caso se determina que es suficiente no se evaluará con la opción con dos paneles.

2. Inversor eléctrico: la generación de energía eléctrica por los paneles fotovoltaicos en corriente continua (DC). La electrónica y el motor necesitaran corriente alterna, además de un sistema que regule la potencia y estabilice la tensión. Para ello se requiere de un inversor eléctrico, que es un dispositivo electrónico capaz de convertir a una señal eléctrica de corriente continua a corriente alterna con la tensión y frecuencia deseada. El inversor para este diseño debe tener las siguientes características:
 - a. Datos Nominales de entrada
 - Potencia asignada: 500 Wp
 - Número de strings de entrada: 1
 - Número de salidas: 2
 - Rango de tensión de entrada 12 V a 850 V
 - b. Datos Nominales de salida:
 - Tensión de salida: 230V
 - Frecuencia de salida: 50Hz
 - Potencia de salida: 500VA
 - Factor de potencia de 0,8 inductivo a 0,8 capacitivo.
 - c. Rendimiento del 90% o superior
 - d. Capacidad de gestión de energía para carga de baterías
 - e. Toma a tierra para descarga de potencia excedente

6.4.6 Protecciones del sistema eléctrico

El sistema eléctrico debe de tener protecciones por el lado de corriente continua por la línea eléctrica que conecta las placas fotovoltaicas y la que alimenta las baterías. Así como la parte de corriente alterna y las líneas de alimentación a cada uno de los componentes. Las secciones de los cables y como estos deben estar protegidos se debe calcular y definir en futuras etapas del proyecto.

Las protecciones necesarias para la parte de corriente continua son las siguientes:

- Protección de fusibles para sobre corrientes de polaridades negativa y positiva.
- Protección de sobretensiones Clase II con conexión a tierra.
- Seccionador de corte en carga de tensiones hasta 1000V de cuchilla rotativa.

Las protecciones necesarias para la parte de corriente alternan son las siguientes:

- Interruptor diferencial de la clase A, para protección contra contactos, de intensidad nominal de 40A y sensibilidad 0,03A, de desconexión fijo instantáneo. Este debe ir colocado en cabecera a la salida de corriente alterna del inversor.



- Interruptor magnetotèrmic automàtic magnetotèrmic de 16A de intensitat nominal de curva C, de 6000A de poder de corte. Estas deben estar conectadas en cada una de las líneas de alimentación de los componentes.

En el Anexo I se detalla con los planos el esquema eléctrico que debe tener el sistema y el esquema unifilar de este.

7 Análisis financiero

7.1 Elaboración del presupuesto

Para analizar financieramente el producto final que se obtendría del diseño del proyecto se elabora un presupuesto de la fabricación de una unidad, que se incluye en el Anexo II. El presupuesto se desglosa por el precio unitario de cada una de las partes del sistema de saneamiento. Este presupuesto se realiza a partir de la base de datos del Banco de la Construcción. De las partes que no se han podido encontrar en la base de datos, se hace una aproximación del precio a partir de la mano de obra de fabricación o instalación de un producto similar que haya en la base de datos y del producto por referencias que se puedan encontrar de fabricantes de componentes similares. Dentro de este presupuesto quedan excluidos los trabajos que puedan conllevar obra civil, albañilería, conexión a redes...

El precio obtenido final de la construcción de una unidad del diseño propuesto en este proyecto se estima con un coste de 41.650,00€ que daría cobertura a 50 personas.

7.2 Definición de precio

El precio que se pretende dar para una unidad del conjunto se hace en base a la vida útil que puede tener este producto, y cuánto podrían pagar los usuarios según su renta per cápita, intentado que el precio a pagar no exceda más del 10% que pueda tener esta.

7.2.1 Vida útil del diseño

La vida útil del proyecto se estima a partir de cuál de sus partes es la menos longeva, pero para ello no se tendrá en cuenta los consumibles que son principalmente los filtros de la parte de depuración.

Así los componentes que afectan al sistema y su estimación de vida útil son:

- Reactor anaerobio: se considera que tiene una larga vida útil (Yaya & Chami, 2015), prácticamente ilimitada por ser un depósito de un material inerte y no oxidable, pero aun así se ve expuesto a una abrasión por los químicos que contienen y se liberan de las heces. Por eso se limita a 20 años.
- Secador: del secador no se hallan referencias, ya que no se conoce producto similar, pero como es un depósito metálico, que solo se ve sometido a calor y de forma moderada (no se exceden los 100°C), se le da una vida útil de 20 años.
- Combustor: para estimar la vida útil de este componente se asimila a la vida útil de una caldera de biomasa. La vida de las calderas de biomasa se estima en 20 años (Ereco, 2019).
- Depósito de choque térmico: para estimar la vida útil de esta parte del diseño se asimila a un acumulador de ACS. La vida útil depende mucho de la calidad del agua y el mantenimiento de este, pero habitualmente se considera una vida útil de 15 años (IDAE, 2010).
- Instalación fotovoltaica: la vida útil de las instalaciones fotovoltaicas va entre los 25-30 años.

El componente que limita la vida útil del diseño es el depósito para choque térmico. Limitando el diseño a 15 años, pero para poder maximizar la vida útil del sistema, se

considera que debe tener un mantenimiento idóneo o más frecuente para que esta pueda alargarse a 20 años como el resto de la mayoría de los componentes.

Finalmente se determina que la vida útil del diseño es de 20 años.

7.2.2 Definición del precio para los usuarios

El precio que deben poder pagar los usuarios de este no puede ser superior al 0,5% para que no sea un coste significativo en una población que mayoritariamente es pobre, y más siendo un diseño que se enfoca para la población más vulnerable.

Basándose en la renta per cápita de la población expuesta en el apartado 5.2, este precio a pagar es de 8,5€ al mes (para la parte económica se supone que 1\$=1€). Así el tiempo que tendría de amortización es:

$$\text{Tiempo de amortización} = \frac{41.650,00\text{€}}{8,5 \frac{\text{€}}{\text{pers.} \cdot \text{mes}} \cdot 12\text{meses} \cdot 50\text{pers.}} = 8 \text{ años y } 2 \text{ meses}$$

Así el tiempo en podría pagar una población de renta media en Arusha estaría por debajo de la vida útil del producto diseñado y puede ser asequible para la población media de Arusha sin acceso a saneamiento.

7.3 Uso final de los recursos producidos

Los productos finales que genera este diseño son el agua que se obtiene de la depuración y potabilización y ceniza de la combustión de las heces secas. También se producen unos gases de esta combustión que se evalúan más adelante.

7.3.1 Uso final del agua potable

Este diseño permite tener acceso a agua potable garantizando, sin contar la recuperación de agua pluvial, un suministro de 72 L diarios para las 50 personas que hacen uso de sistema de saneamiento comunitario, que sería de 1,44 L por persona, que sería suficiente para cubrir las necesidades de agua potable para beber que necesita una persona que estima que es de 1 a 3 L diarios (Conant.J, 2005).

El impacto económico real de este suministro de agua es difícil de saber, ya que es un país donde el agua se recolecta de efluentes naturales y fuentes públicas principalmente (Africa Development Bank Group, 2015). Pero para poder tener un orden de magnitud se comparará con el precio del agua embotellada. Este es de 0,38€/L según la base de datos de productos "Global Product Prices" (www.globalproductprices.com). Así el beneficio económico anual que tendría cada usuario del diseño sería de 199,72€ anuales, añadiendo además la garantía y control de calidad este suministro, facilitando el acceso a esa parte importante de la población que no tiene acceso a ella.

7.3.2 Uso final de las cenizas

También daría un total de 149,65 kg de cenizas producidas por la combustión de las heces secas, que se puede usar como fertilizante para abonar los campos, que puede ser útil para una región y país donde la mayoría de su población vive de la agricultura. Las cenizas producidas por la combustión de las heces secas pueden ser comparables a las de la biomasa y contendrían un fuerte poder alcalino así como un importante contenido de nutrientes como K, Ca, Mg y P (Solla-Gullón et al., 2005), excluyendo el Mg que no se

encuentra en la caracterización inicial de las heces humanas, que estarían en la concentraciones de la siguiente tabla:

Tabla 18. Concentraciones en masa de los nutrientes contenidos en la ceniza. Vía: Solla-Gullón et al., 2005.

N	P	Ca	K
1,9 g/kg	5,2 g/kg	198,0 g/kg	30,2 g/kg
0,19%	0,52%	19,8%	3,02%

Estas concentraciones cumplirían con los requerimientos del abono orgánico de relación de nutrientes expuesto en el apartado 3.3.3.

La relación entre cantidad de fertilizante y ha de terreno de cultivo no debe exceder los 170 kg por hectárea de terreno cultivable (Chávez Custodio, 2020). Así que con el fertilizante obtenido sería posible fertilizar una hectárea.

Sabiendo que el precio del fertilizante orgánico es de alrededor de 2€/kg y 1,2€/kg (Rípodas Ancín, 2011), suponiendo el escenario peor, en cuanto a beneficio económico tanto por ahorro como venta, para los usuarios del fertilizante se supondrá el precio más barato. Con el precio de 1,2€/kg supondría un beneficio económico de 179,58€/anuales para la población.

7.4 Beneficio frente al saneamiento convencional

El principal motivo de este diseño es la ventaja en cuanto a facilidad tanto logística como económica de implementación frente al saneamiento convencional. Facilitando el acceso al saneamiento a las personas que no disponen de él. Por esto se analizará la diferencia de costes entre un saneamiento convencional, que requiere de una compleja red de tuberías para el transporte de las aguas residuales hasta el punto de tratamiento que suele ser una EDAR.

Debido a que el saneamiento convencional es para dar cobertura a grandes zonas, para poder hacer una comparación cuantitativa se compara el coste de la implementación de una EDAR para toda la población de Arusha y el número de estaciones que se requerirán y el coste de estos para dar cobertura al mismo número de personas.

Según un estudio realizado por la fundación ODI en 2015 para poder dar cobertura de saneamiento a toda la población de Tanzania se requeriría una inversión de 49,3 billones de dólares (Matoso et al, 2015). Para estimar el coste que requeriría en la implementación para la ciudad de Arusha se simplifica por proporción directa de habitante. Así sabiendo que la población de Tanzania es de 59.734.213 (Banco Mundial, 2021), el coste de la implementación de este saneamiento es de 825,32, que serían 40.688,40€ (para la parte económica se supone que 1\$=1€).

Como se ha definido en el apartado anterior el coste que tendría dar cobertura de saneamiento a un grupo de 50 personas es de 41.650€.



Comparando los datos económicos el coste para implementar saneamiento convencional para una persona es prácticamente el mismo que tendría implementar el saneamiento diseñado que abastece a 50 personas. Esto daría como resultado una relación de precios de 1 a 50 favoreciendo el ahorro económico de forma muy grande al saneamiento diseñado en este proyecto.

8 Análisis de seguridad

El diseño de este proyecto tiene puntos que en su operación y mantenimiento pueden ser peligrosos para los usuarios y se debe de tener en cuenta. Algunos de estos aspectos ya se han ido viendo en el análisis de impacto ambiental, pero deben de ser evaluados el impacto en las personas y sus medidas correctoras y de prevención.

A nivel de equipos que puedan tener afectación para las personas usuarias o que operen el diseño son los siguientes:

- El lodo y efluente contenido en el reactor anaerobio.
- El lecho filtrante de todos los equipos de filtraje.
- El cuerpo del secador y el combustor.
- La salida de humos del combustor.
- Los componentes eléctricos del sistema.

Como ya se ha visto en apartados anteriores el lodo y efluente contenidos en el reactor anaerobio, como el lecho filtrante, a pesar de tener una reducción de patógenos y ser más estables que las heces y orina de partida no están totalmente esterilizados y este puede tener efectos adversos para las personas por la transmisión de patógenos que tengan contacto con estas partes del diseño. Estos si no son manipulados con total seguridad pueden tener serios riesgos de enfermedades para las personas.

El cuerpo del secador y el combustor también pueden ser peligrosos para los usuarios o operadores del diseño, ya que estos cuando están funcionando estos componentes los cuerpos metálicos de los que están hechos pueden alcanzar temperaturas elevadas, especialmente en el combustor de hasta 500°C, tienen riesgos de generar quemaduras a las personas en contacto con las superficies de estos equipos. Por ello estos equipos deberán estar aislados térmicamente, para que la superficie no se eleve de temperatura y deben estar correctamente señalizados avisando del peligro de quemaduras.

La salida de humos del combustor debe abocar los gases al aire libre, ya que si la combustión se realiza correctamente no presenta efectos adversos como ya se ha visto en el apartado anterior. La sala que pueda contener el combustor, en caso de que no se coloque al aire libre, debe de contener una buena ventilación, para que en caso de fuga en la chimenea que evacua los gases producidos, estos no se acumulen en la sala y al entrar un usuario u operador se pueda intoxicar con ellos.

Los componentes eléctricos del sistema tienen el riesgo de electrocución, en caso de tener contacto directo con la parte de conductores. Por ello todo el circuito tiene que estar con una toma a tierra, para que no se produzca electricidad estática y con un interruptor diferencial que proteja a las personas en caso de contacto directo. Una de las partes más peligrosas es el circuito eléctrico que va desde el panel fotovoltaico hasta el inversor, debido a que se trata de corriente continua y esta no puede ir protegida con un diferencial. Por esto todo el cableado conductor debe estar protegido mecánicamente y señalizado alertando del peligro a los usuarios.

9 Conclusiones

Aplicando los criterios de diseño seguidos a lo largo del proyecto se puede concluir que se obtiene un diseño de un sistema para poder realizar un saneamiento autónomo, sin la necesidad de conexión a una red de cloacas que derive a una estación depuradora convencional. La ventaja que presenta este diseño es que se puede realizar con materiales de fácil acceso, que su instalación puede ser muy versátil en cuanto a distribución en el espacio y puede realizarse este diseño sin requerir una producción en masa. Buscando la máxima sencillez y simplificación del sistema.

Se considera que este diseño puede realizarse a un bajo costo en base al poder adquisitivo de la población de la región a la que se enfoca este diseño. Esto permite que la comunidad pueda optar a la implementación de este sistema por decisión propia, sin requerir de ayuda de capital externo. Además de fomentar su implicación en la gestión de los residuos, y que se conviertan en recursos importantes para una comunidad principalmente rural y con bajo acceso al agua potable. Creando la posibilidad de que estos recursos, agua potable y cenizas, reporten un incentivo económico para los usuarios y un aumento de su calidad de vida.

Además, después de comparar los costes de este tipo de saneamiento contra el saneamiento convencional, se puede ver que este tipo de diseños ofrecen una solución alternativa al saneamiento convencional, que puede ser más económica y fácil de implementar. Especialmente en zonas rurales donde no hay una gran densidad de población.

Para la próxima fase de desarrollo del diseño, se deberá finalizar el dimensionamiento final de los equipos, pudiendo tener el suficiente detalle para realizar un primer prototipo y comprobar la eficiencia del diseño, obtener resultados empíricos la correcta potabilización del agua y una caracterización de las cenizas que permita estudiar su efecto y necesidad de uso en cultivos agrícolas. También se debe definir el mecanismo de separación del lodo y el efluente. También el transporte del lodo del reactor al secador y el producto de éste al combustor para que el sistema pueda tener una autonomía total. Y poder redimensionar el sistema energético para ampliarse en caso de ser necesario.

Por último, para una futura fase de implementación es de gran importancia que se creen un vínculo de aceptación entre los usuarios y el diseño, integrándolos en una fase de desarrollo estético de este, para que reciba la aceptación de la comunidad y pueda tener gran éxito en su implementación.

10 Referencias

- Africa Development Bank. (2015). Arusha Urban Water Supply and Sanitation Service Improvement Project. Africa Development Group Data Portal. <https://acortar.link/7zjlmz>
- Ancín Rípodas, M. (2011). Evaluación de diferentes tipos de fertilizantes químicos y orgánicos en la producción de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. var. Alubia) en el distrito de San Juan de Castrovirreyrna-Huancavelica (Perú).
- Ansi Sanitation (2015) <https://sanitation.ansi.org/TorontoToilet>
- Ansi Sanitation (2015) <https://sanitation.ansi.org/NanomembraneToilet>
- Arusha, Tanzania Metro Area Population 1950-2022. www.macrotrends.net .Retrieved 2022-01-12. <https://www.macrotrends.net/cities/22893/arusha/population>
- Banco Mundial. 1993. World Development Report 1993 : Investing in Health. New York: Oxford University Press. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/5976> License: CC BY 3.0 IGO
- Banco Mundial. 2006. World Development Report 2007 : Development and the Next Generation. World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/5989> License: CC BY 3.0 IGO.
- Banco Mundial. 2007. World Development Report 2008 : Agriculture for Development. Washington, DC. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/5990> License: CC BY 3.0 IGO
- Barrera Hernández, J. C., Ramírez Contreras, N. E., & García Núñez, J. A. Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite.
- Bernardos, A., Gaston, M., Fernandez-Peruchena, C., Ramirez, L., Vindel, J. M., Pasturino Amarillo, L. M., ... & Liria, J. (2015). Solar resource mapping in Tanzania: solar modelling report (No. 96827, pp. 1-48). The World Bank.
- Carrasco Venegas, L. A. (2015). Diseño y construcción de un gasificador de lecho fijo para la producción de gas de síntesis.
- Catalogo de residuos utilizables en construcción, Ministerio de Agricultura, Alimentación y transporte (2021) <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/30/lodos-de-depuradoras/valorizacion/tratamiento-de-deshidratacion-y-secado-termico/130/propiedades-de-los-lodos-secos.html>
- Chávez Custodio, D. A. (2020). Efecto del estiércol de ovino y la fertilización NPK en el rendimiento de *Hordeum vulgare* L. var. Zapata en Alto Paraíso, Santiago de Chuco. TAGN 452.
- Chiclote, Y. E. (2018). Mejora de la calidad del agua del río Cumbe empleando filtro de carbón activado (Tesis de licenciatura). Repositorio de la Universidad Privada del Norte. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11537/13839>
- Chulluncuy Camacho, Nadia Cristina (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. Ingeniería Industrial, (29),153-170.[fecha de Consulta 13 de Enero de 2022]. ISSN: 1025-9929. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=337428495008>
- CIA. «The World Factbook». [Consulta: 4 junio 2013].
- Cid, C. A., Qu, Y., & Hoffmann, M. R. (2018). Design and preliminary implementation of onsite electrochemical wastewater treatment and recycling toilets for the developing world. Environmental science: water research & technology, 4(10), 1439-1450.
- Composición química de las heces <https://www.eautarcie.org/es/05e.html>

Composting: Sanitary Disposal and Reclamation of Organic Wastes (o Compostaje: eliminación sanitaria y recuperación de residuos orgánicos), por Harold B. Gotaas, monografía bajo los auspicios de la OMS, 1956, p. 3

Conant, J. (2005). Agua para vivir. Cómo proteger el agua comunitaria.

Cristo Valdés, E., González Cepero, M. C., & Pérez León, N. (2016). Evaluación de nuevos cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) En condiciones de bajos suministros de agua y fertilizante en la provincia Pinar del Río. *Cultivos tropicales*, 37(2), 127-133.

Cruddas, P., Parker, A., & Gormley, A. (2015, July). User perspectives to direct water reuse from the Nano Membrane Toilet. In 38th International WEDC Conference: Water, Sanitation and hygiene services beyond 2015-Improving access and sustainability. WEDC, Loughborough University.

Cruz, G., Guzmán, V., Rimaycuna, J., Alfaro, R., Cruz, J., Aguirre, D., & Ubillus, E. (2016). Tratamiento complementario de agua potable utilizando un filtro de carbón activado impregnado con quitosano producidos a partir de biomasa residual. *Manglar*, 12(1), 65-74.

Dionisio, S., & Satorius Stedim Biotech. (2017). Conceptos básicos de filtración. <http://www.bdcint.com.do/wp-content/uploads/2017/06/Conceptos-basicos-de-filtracion-Pharm-vDS-Junio-2016.pdf>

EDP Energía (2021) <https://www.edpenergia.es/es/blog/sostenibilidad/energia-minieolica/>

España. Real Decreto 140/2003, de 21 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

España. Real Decreto 506/2013 de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.

Factor Energía (2021) <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/que-son-energias-alternativas/>

Fandos, E. G., Calleja, C. A., Escámez, P. F., Sillué, S. M., Rafecas, M., Lázaro, D. R., & Oliag, P. T. (2021). Informe del Comité Científico de la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) sobre las combinaciones tiempo-temperatura necesarias para el cocinado seguro de los alimentos y las temperaturas adecuadas para el mantenimiento en caliente y recalentamiento de las comidas preparadas. *Revista del Comité Científico de la AESAN*, (33), 113-150.

Filtro de carbón activo, Tuawa <https://tuawa.es/blog/como-funcionan-los-filtros-de-carbon-activado/>

Gabarrón, S., Dalmau, M., Monclús, H., Comas, J., & Rodríguez-Roda, I. (2015). Design and operational issues of 7 full-scale MBRs for municipal wastewater treatment. *Revista Cintex*, 20(1), 35-51.

García-Pacheco, R., Li, Q., Comas, J., Taylor, R. A., & Le-Clech, P. (2021). Novel housing designs for nanofiltration and ultrafiltration gravity-driven recycled membrane-based systems. *Science of the Total Environment*, 767, 144181.

Grupo Villar Mir (2019) <https://www.energyavm.es/energia-solar-termica/>

Grupo Novelec (2018) <https://blog.gruponovelec.com/energias-renovables/fuentes-de-energia-no-renovables-tipos-y-caracteristicas/>

Guerrero Nieto, D. P., & Ortiz Atancuri, P. Á. (2011-11-11). Pruebas básicas de laboratorio clínico en estudiantes secundarios del Colegio Nacional Checa, del área de influencia del Centro de Salud No 2 de la ciudad de Cuenca 2011 (Bachelor's thesis). Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/3829>

Guy Sela (2020). Fertilización y riego – Teoría y mejores prácticas.

HENNIGS, Jan, et al. Planning and communicating prototype tests for the Nano Membrane Toilet: A critical review and proposed visual tool. Gates open research, 2019, vol. 3.

Herzen, B., Talsma, L. (2014). Conversion of human waste into biochar using pyrolysis at a community-scale facility in Kenya - Various documents on results from research grant. Stanford University and The Climate Foundation, Stanford, California, USA.

IDAE (2021) <https://www.idae.es/ca/tecnologias/energias-renovables/us-electric/solar-fotovoltaica>.

IDEA (2021) <https://www.idae.es/ca/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/energia-solar-termica>.

IDEA (2021) <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biomasa>.

Ignacio, B. O. (2007). Gestión de cenizas como fertilizante y enmendante de plantaciones jóvenes de Pinus radiata (Doctoral dissertation, Universidade de Santiago de Compostela).

Lámparas UV-C: ¿puede algo que mata bacterias y virus ser dañino también para la salud de las personas?, Departamento de sanidad y seguridad alimentaria, Comisión Europea (2017).

LAS CALDERAS DE BIOMASA: EFICIENCIA, SOSTENIBILIDAD, Eresco Ambiental (2019) <http://erecoambiental.com/2019/02/22/las-calderas-de-biomasa-eficiencia-sostenibilidad/>

Lesikar, B. J., & Enciso, J. (2000). Filtro de arena. Servicio de Extensión Agrícola de Texas, el Sistema Universitario Texas A & M.

Linares-Lujan, G., Echeverria-Perez, C., Cespedes-Aguilar, T. Potencial energético de la zona rural del Departamento de la Libertad (Perú) producido por biogas obtenido de excretas humanas. Tecnología en Marcha. Vol. 30-4. Octubre-Diciembre 2017. Pág 108-117.

Llanos Angeles, S. M., & Mirano Celis, H. C. (2018). Evaluación de la eficiencia de filtro de arena y filtro de piedra caliza, en la remoción de parámetros físicos, de las aguas de la quebrada La Oyada, Moyobamba, Perú–2017.

Low-cost Decentralized Sanitary System for Treatment, Water and Resources Recovery (National University of Singapore) www.forum.susana.org

Masanja, N. M., & Nyambita, J. The Influence of Human Resource Management Practices on Employee Performance: A Case of Arusha Urban Water Supply and Sanitation Authority.

Merus Flüssigkeitsbehandlung (2021) <https://www.merus.es/ufc-unidad-formadora-colonias/>

METCALF & EDDY. (Mc. Graw-Hill, 1998), "Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y restauración".

Onabanjo, T., Kolios, A. J., Patchigolla, K., Wagland, S. T., Fidalgo, B., Jurado, N., Hanak, D. P., Manovic, V., Parker, A., McAdam, E., Williams, L., Tyrrel, S., & Cartmell, E. (2016). An experimental investigation of the combustion performance of human faeces. Fuel (London, England), 184, 780–791. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.077>

Penn, R., Ward, B. J., Strande, L., & Maurer, M. (2018). Review of synthetic human faeces and faecal sludge for sanitation and wastewater research. Water research, 132, 222-240.

Perspectiva ambiental. 2003. Compostaje. Fundació Terra. Barcelona, España

Planta de tratamiento de lixivados, Telwesa (2020) <https://telwesa.com/>

Preguntas más frecuentes sobre el RD 902/2018 www.sanidad.gob.es

Productos, Coopensa (2021) <http://www.copersa.com/es/catalogo/filtros-de-malla-autolimpiantes/filtros-de-malla-autolimpiantes-serie-3000/ p:105/>



Productos fertilizantes www.mapa.gob.es

Que es un filtro de cartucho, Bqua (2021) <http://www.bqua.com/que-es-un-filtro-de-cartucho-definicion/>

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: *Diccionario de la lengua española*, 23.^a ed., [versión 23.5 en línea]. <https://dle.rae.es> [30/09/2021].

Rein, Guillermo. "Smouldering combustion phenomena in science and technology." (2009).

SCHEER (Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks), Preliminary opinion on groundwater quality standards for proposed additional pollutants in the annex to the Groundwater Directive (2006/118/EC)

Solla-Gullón, F., Soalleiro, R. R., & García, A. M. (2005). Respuestas de plantaciones forestales jóvenes sobre suelos ácidos a la fertilización con cenizas de biomasa. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (20), 227-232.

Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., & Zurbrügg, C. (2018). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento* (2nd ed.).

TOBIAS, Robert, et al. Early testing of new sanitation technology for urban slums: the case of the Blue Diversion Toilet. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 576, p. 264-272.

UNESCO, ONU-Agua, 2020: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático, París, UNESCO.

University of Toronto, Research Department of Engineering (2015) <https://cgen.utoronto.ca/research-initiatives/re-invent-the-toilet-challenge/>

Van-Loo, S. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring*. Routledge

Varnero, M. (2011). *Manual de biogás*. Santiago de Chile: FAO.

Veiga Barbazan, M, "Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) FT-BIO-009 " Ficha Técnica, 2015.

Vivanco, E., Yaya, R., & Chamy, R. *Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales*. CYTED. Recuperado, 2.

WEDC (2012) *Latrine slabs: an engineer's guide*, Ed. Water, Engineering and Development Centre.

Wikipedia. (2021, 10 13). Wikipedia. Rotavirus. <https://ca.wikipedia.org/wiki/Rotavirus>

Wikipedia. (n.d.). Wikipedia. Shigella. <https://ca.wikipedia.org/wiki/Shigel%C2%B7la>

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2017. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. París, UNESCO.

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO). 2019. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. París, UNESCO.

Yadira Carrillo, V., & Sanchez Muños, N. (2013). *ELABORACION DE UN FILTRO A BASE DE CARBON ACTIVADO OBTENIDO DEL ENDOCARPO DE COCO CON EL PROPOSITO DE REDUCIR LA DUREZA EN EL AGUA POTABLE*. San Salvador: Universidad de el Salvador.