Universidad Tecnica Federico Santa María
Departamento de Ingenería Mecánica
Valparaíso
Chile

“Diseño de un sistema de generación de Biogás utilizando el metodo de co-digestión anaeróbica de heces humanas”

Autor: Álvaro Romero Vicencio.
Memoria para optar al titulo de Ingeniero civil Mecánico.

Profesor Guía:
Dipl. Ing. Udo Rheinschmidt.

Profesor Correferente:
Dr. Santiago García.

Agosto 2021

Agradecimientos

Para todos mis compañeros y profesores que me ayudaron a sacar adelante este trabajo.

1. Abstract

As you may well know, Biogas is a biological type of fuel that is being used in a lot of places around the world, not just as a compund to produce energy or movement, but also to feed different kinds of populations and cities with clean gas for their daily life at home. Biogas is obtained as result of the aerobic and anaerobic digestion that takes place in different places in the enviroment, but we haven't taken advantage of this and now we are paying the consequensces because of the global warming situation and the pollution of our seas and rivers. For this and many other reasons is why today biogas plants and systems are expanding and creating a new resource for us to embrace.

The technologies now days are very mature and trustworthy because of the new industrial revolution that we're living on. But with all that being said, why we didn't used this type of fuel earlier? The best answer for this question is because of the taboo and ignorance that all human wastes carry. Human feces and trash have always been considered without any useful purpose, mainly because of its appereance and extremely bad smell, and of course because of all of the despiteful thoughts that has stained it over the years. But what if we could extract biogas and other stuff from them, what if we could give an use to this so hated element. Today there are many examples of countries that are taking advantage of that richfull resource like Germany, Sweden or India. Because of that more goverments are taking a more important role in this matter, not just because of the energy or fuel benefits that this resource carries, but also because of the impact in nature. We are talking about water recycling, manure production, no more waste realising to the natural world, etc. All of this only because we are getting ourselves more and more into this unknown situation of using trash to generate competent products.

Biogas as said at the begininng, is the result of the anaerobic or aerobic digestion in nature, but scientist were able to replicate this process in the laboratory and create a sort of reactor where all the magic takes place. In this thesis we will talk about the anaerobic reaction that is the more eficient and efective generally speaking, how it works and the process that involves in it. And also there is a plan for create and install a reactor in the university with the purpose of obtain some real benefits out of this, and of course if all this works, maybe apply this system in other parts of the region that are in a strong need for new methods of water treatment.

Índice

1. Abstract 2
2. Introducción 13
2.1. Problematica 14
3. Estado del Arte 17
3.1. Estado Actual del Recurso Hidrico 17
3.2. Sistemas de Saneamiento 20
3.2.1. Panorama Actual 20
3.3. Microorganismos Patogenos 22
3.4. Alternativas de Saneamiento 24
3.4.1. Secado Termico 27
3.4.2. Compostaje 27
3.4.3. Tratamiento Aerobio 28
3.4.4. Incineración 28
3.4.5. Digestión Anaerobica: 28
3.5. Generación de Biogas 33
3.5.1. Sustrato 33
3.5.2. Inóculos 34
3.5.3. Biodigestor 35
3.5.3.1. Biodigestor de Flujo Discontinuo 36
3.5.3.2. Biodigestor de Flujo Semicontinuo 36
3.5.3.3. Modelo Chino 36
3.5.3.4. Modelo Indio 37
3.5.3.5. Biodigestor de Flujo Continuo. 38
3.5.3.6. Biodigestor de Flujo Pistón. 38
3.5.3.7. Modelo horizontal. 38

3.6. Parámetros Ambientales de funcionamiento 39
3.7. Parámetros operacionales de funcionamiento 41
3.7.1. Tratamiento del sustrato antes del Biodigestor: 44
3.8. Codigestión: 45
3.9. Puesta en marcha 46
3.10. Subproductos generados a partir del proceso de biometanización47
3.11. El biogás 47
3.11.1. Aplicaciones del Biogas.....50
3.12. Eliminación de Patogenos 51
3.13. Antecedentes Internacionales 54
3.14. Contexto Nacional 56
4. Metodología Experimental en Laboratorio..... 58
4.1. Objetivo 58
4.2. Condiciones Iniciales 59
4.2.1. Substrato 59
4.2.2. Inoculo 60
4.2.3. Parametros durante el proceso. 60
4.3. Cantidad de Muestras 62
4.4. Agitación 62
4.5. Set up Experimental. 63
4.6. Recolección de la Información 64
5. Metodología de Diseño 66
5.1. Etapa 1: Investigación 67
5.2. Etapa 2: Planificación..... 67
5.3. Etapa 3: Definición del proyecto 67
5.4. Etapa 4: Diseño..... 68

5.5. Etapa 5: Desarrollar 68
6. Desarrollo 69
6.1. Etapa 1: Investigación 69
6.1.1. Temperatura 69
6.1.2. Agitación 72
6.1.3. Reutilización de Residuos 76
6.1.4. Reutilización de la Orina 83
6.2. Etapa 2: Planificación 85
6.2.1. Asignación de Subsistemas 85
6.3. Etapa 3: Definición del Proyecto 86
6.3.1. Funcionalidad 86
6.3.2. Especificaciones: 88
6.4. Etapa 4: Diseño 89
6.4.1. Prototipo Inicial 89
6.4.2. Diseño del Detalle 94
6.4.2.1. Subsistema Calefacción 94
6.4.2.2. Subsistema de Agitación 101
6.4.2.3. Sub-sistema de Ventilación 108
6.4.2.4. Subsistema de Tratamiento Secundario. 109
6.4.2.5. Piping y Almacenamiento del Biogas 112
6.4.2.6. Aspectos Económicos 116
6.5. Etapa 5: Desarrollo 119
6.5.1. Modelo de Simulación 119
6.5.2. Simulación 126
6.5.3. Resultados. 127
7. Análisis y Discusión 131
7.1. Análisis de Simulación 131

7.2. Comparacion con Ensayo Teórico 132

7.3. Comparaciones con Ensayos Experimentales. 134

7.4. Discución 138

7.5. Trabajos Futuros 141

8. Referencias 142

Indice de Figuras.

Figura 1: Mapa de la sequía en Chile por región. Fuente: (El Mercurio, 2019). 18
Figura 3: Historial del caudal anual Rio Aconcagua. Fuente: (ODEPA, 2016). 19
Figura 4: Usos del Agua en Chile. Fuente: (BID, 2011). 19
Figura 5: Proporción de la población mundial que tienen acceso a método de saneamiento. Fuente: (Unicef, 2015). 21
Figura 6: Microorganismos del agua y enfermedades hídricas. Fuente: Moro (2011) 24
Figura 7: Esquema de un Baño seco. Fuente: (Manual de construcción de baño ecológico, 2018). 25
Figura 8: Prototipo de baño seco diseñado por la Universidad de Cranfield. Fuente: (The nano membrane toilet, 2019). 26
Tabla 1: Digestión Anaerobia vs Digestión Aerobia 29
Figura 9: Etapas de la digestión anaeróbica. Fuente: (Moraes et al, 2015) 32
Tabla 2: Grupos de bacterias que participan en la digestión anaerobia. 34
Figura 11: Biodigestor modelo Chino. 37
Figura 12: Biodigestor modelo Indio. 37
Figura 13: Biodigestor Horizontal. 39
Figura 14: Rangos de pH de diferentes Inóculos durante el proceso anaerobio. Fuente: (Corrales et al., 2015). 40
Figura 15: Rangos de temperatura de diferentes inóculos durante el proceso anaerobio. Fuente: (Corrales et al., 2015) 42
Figura 16: Eliminación de sólidos volátiles y producción volumétrica de gas para un reactor anaerobio continuo de mezcla completa en función del tiempo de retención hidráulico. Fuente: (BESEL, 2007) 43
Figura 17: Producción de gas por unidad de carga en función de la velocidad de carga. Fuente: (BESEL, 2007). 44
Figura 18: Tabla de inconvenientes de diferentes residuos. Fuente: (Mata-Alvarez et al., 2014) 45
Tabla 4: Rangos de composición típicas del biogás. Fuente: (Moraga, 2017) 49
Tabla 5: Equivalencia energética del biogás en comparación con otros combustibles. Fuente: (Manual del biogás, 2011) 49
Figura 19: Concentración de patógenos presentes luego del proceso de estabilización Fuente: (Mindreau Ganoza et al., 2016). 52
Figura 20: Reducción de bacterias después de la aplicación de diferentes TRH en la digestión anaeróbica en: a) condiciones mesofílicas; b) condiciones termofílicas. Fuente: (López y cols., 2020) 53
Figura 21: Números de Salmonella (a) y enterococos (b) (log UFC g 1) en función del tiempo (h) en cultivos discontinuos de control y de alto contenido de amoníaco. Fuente (Ottonson et al., 2008) 54
Figura 22: Plantas de biogás en operación a nivel mundial. Fuente: (Cedigaz, 2017) 55
Figura 23: Producción de biogás en Chile 56

Figura 24: Ensayos tipo Batch en laboratorio. 59
Figura 25: Método de adición de nutrientes necesarios para el ensayo. Fuente: (Angelidaki et al., 2009). 62
Figura 26: Set up de recipientes batch durante el ensayo. 63
Figura 27: Grafico de potencial de biogas de un ensayo tipo batch. Fuente: (Angelidaki et al., 2009). 64
Figura 28: Ilustración del modelo Metodológico I+P+D3 67
Figura 29: Esquema de un sistema de calefacción para un biodigestor industrial. 70
Figura 30: Gráficos de producción de biogás bajo diferentes temperaturas Fuente: (Wang et al., 2019) 71
Figura 31: Estructura de la comunidad microbiana en la fase acidogénica a diferentes temperaturas: a) nivel de filo; b) nivel de clase; c) nivel de género. Fuente: (Wang et al., 2019) 71
Figura 32: Grafico de descomposición de solidos volátiles y remoción del COD vs Intensidad de Agitación. Fuente: (Trisakti et al., 2017) 73
Figura 33: Grafico producción de biogás vs Intensidad de agitación Fuente: (Trisakti et al., 2017). 73
Figura 34: Comparación de la producción de metano entre dos digestores con y sin agitación. Fuente: (Tian et al., 2014) 74
Figura 35: Abundancia dinámica de los diferentes inóculos durante el proceso anaerobio en dos digestores con y sin agitación. Fuente: (Tian et al., 2014) 75
Figura 36: Tabla de concentraciones máxima para biosólidos clase A y B. Fuente: (USEPA, 1994). 76
Figura 37: Tabla de concentración de metales pesados para biosólidos clase B. Fuente: (EPA, 2011) 77
Figura 38: Tablas de valores de Inactivación de bacterias Gram-negativas en la digestión anaeróbica (a) E. coli (b) Coliformes y (c) Salmonella. Fuente: (Jiang et al., 2020). 79
Figura 39: Efecto de la digestión anaeróbica mesófila y termófila en la inactivación de microorganismos patógenos. Fuente: (Pliego-Arreaga et al., 2013) 80
Figura 40: Producción de biogás bajo el régimen termofílico (izquierda) y mesofílico (derecha) Fuente: (Pliego-Arreaga et al., 2013) 80
Figura 41: Remoción de antibióticos bajo el régimen mesofílico. Fuente: (Youngquist et al., 2016). 81
Figura 42: Remoción de antibióticos mediante el método de compostaje. Fuente: (Youngquist et al., 2016). 82
Figura 43: Esquema de un sistema de purificación de orina por osmosis directa. Fuente: (Volpin et al., 2019) 84
Tabla 4: Asignación de subsistemas 85
Tabla 5: Esquema de funcionalidad del sistema de generación y baño seco. 87
Tabla 6: Especificaciones del sistema 88
Figura 44: Diseño inodoro en Autodesk Inventor Fuente: (Tesis Oliden. C, 2020) 90
Figura 45: Diseño modelado en Autodesk Inventor Fuente: (Tesis Oliden. C, 2020) 90

Figura 46: Ducto de descarga con estructura de soporte diseñado en Autodesk Inventor. Fuente: (Tesis Oliden. C, 2020).....91
Figura 47: Representación de tornillo separador de orina y heces. Fuente: (Mercer et .92 al., 2016).....92
Figura 48: Diseño tornillo sin fin para transporte de heces en Autodesk Inventor. Fuente: (Tesis Oliden. C, 2020).....92
Figura 49: Esquema del biodigestor propuesto. Fuente: (Tesis Oliden. C, 2020).....93
Figura 50: Funcionamiento de un colector solar simple.....94
Figura 51: Diseño serpentín de calefacción biodigestor en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia 95
Figura 52: Representación de colector solar en el sistema de calefacción en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia 96
Tabla 6: Costos del equipo de calefacción solar. 96
Figura 53: Esquema de funcionalidad de un calefón convencional 98
Figura 54: Diseño carcasa equipo de calefacción a biogás en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia 98
Figura 55: Diseño intercambiador de calor equipo de calefacción a biogás en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia. 99
Figura 56: Diseño campana de extracción de gases de combustión equipo de calefacción a biogás en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia.....100
Figura 57: Diseño quemador de biogás de equipo de calefacción en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia. 101
Figura 58: Costos del equipo de calefacción a biogás.....101
Figura 59: Agitador comercial de palas horizontal (izquierda) y representación de flujo radial (derecha). 102
Figura 60: Representación dimensiones agitador y estanque (izquierda) y relaciones de cálculo (derecha) . Fuente: (Castillo, 2013) 103
Figura 61: Diseño sistema agitación en Autodesk Inventor. Fuente: Elaboración Propia. 105
Figura 62: Diseño ensamble sistema agitación en el biodigestor, motor eléctrico (a), acople (b), placas rodamiento (c), rodamiento (d), tapa digestor (f), sello mecánico (g). Fuente: Elaboración Propia 107
Tabla 7: Costos sistema de agitación 107
Figura 63: Esquema subsistema Ventilación Fuente: Elaboración Propia.....108
Figura 63: Representación extractor de olores subsistema de ventilación. Fuente: Elaboración Propia. 109
Figura 64: Diseño compostera para subsistema de tratamiento secundario en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia. 110
Figura 65: Compostera giratoria comercial para heces humanas. 111
Tabla 8: Costos subsistema de tratamiento secundario.....111
Figura 66: Esquema de Piping en sistema de generación en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración propia. 113
Figura 67: Esquema de Piping para transporte de biogás. Fuente: Elaboración Propia

.....114
Figura 68: Representación de estanque acumulador de biogás en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia. 115
Tabla 9: Costos de Piping y acumulación del biogás 116
Tabla 10: Presupuesto total para el diseño e implementación del sistema de generación.....116
Figura 69: Esquema, ensamble y distribución de equipos y componentes del sistema de generación en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración propia.....118
Figura 70: El modelo anaeróbico tal como se implementa incluyendo procesos bioquímicos (1) acidogénesis de azúcares (monosacárido, MS), etanol, glicerol y lactato, (2) acidogénesis de aminoácidos (AA), (3) acetogénesis de LCFA, (4) acetogénesis de propionato, (5) acetogénesis de butirato y valerato, (6) aceticlástico metanogénesis, y (7) metanogénesis hidrogenotrófica. Fuente: (García-Gen et al., 2013) 121
Figura 71: Cálculos estequiométricos para la implementación generalizada de sustratos fermentables. Ejemplo para etanol, glicerol y ácido láctico. Fuente: (García-Gen et al., 2013) 123
Tabla 11: Procesos bioquímicos y sus expresiones cinéticas consideradas en el modelo. Se destacan los nuevos procesos; el resto permanecen como en ADM1 (la absorción de azúcares no se considera un proceso nuevo, pero se modifica con respecto al ADM1 original). Fuente: (García-Gen et al., 2013) 124
Tabla 12: Composición y caracterización de las heces humanas.....126
Tabla 13: Parámetros de simulación y operación de digestor. 127
Figura 72: Flujo de biogás diaria vs tiempo (días).....128
Figura 73: Composición del biogás producido vs tiempo (días).....128
Figura 74: Grafico de variación de pH vs tiempo (días). 129
Figura 75: Grafico de remoción de COD vs tiempo (días).....129
Figura 76: Gráfico remoción de solidos vs tiempo (días). 130
Figura 77: Potencial bioquímico del biogás a diferentes ratios de mezclas. Fuente: (Kesharwani & Bajpai, 2020). 133
Figura 78: Sistema de generación de biogás propuesto utilizando heces humanas. Fuente: (Andriani et al., 2015).....134
Figura 79: Producción acumulada de metano medida en el tiempo. Fuente: (Young et al., 2014).....135
Figura 80: Potencial bioquímico de biogás y producción acumulada biogás en el tiempo. Fuente: (Poocheera et al., 2014) 136
Figura 81: Esquema de sistema de generación de biogás del proyecto. Fuente: (Schwartz et al., 2015).....138
Figura 82: Aplicaciones que tiene 1 metro cúbico de biogás. Fuente: (Andriani et al., 2015) 139

Indice de Tablas.

Tabla 1: Digestión Anaerobia vs Digestión Aerobia 29
Tabla 2: Grupos de bacterias que participan en la digestión anaerobia. 34
Tabla 3: Rangos de composición típicas del biogás. Fuente: (Moraga, 2017) 49
Tabla 4: Asignación de subsistemas 85
Tabla 5: Esquema de funcionalidad del sistema de generación y baño seco. 87
Tabla 6: Especificaciones del sistema 88
Tabla 7: Costos del equipo de calefacción solar. 96
Tabla 8: Costos sistema de agitación 107
Tabla 9: Costos subsistema de tratamiento secundario. 111
Tabla 10: Costos de Piping y acumulación del biogás 116
Tabla 11: Presupuesto total para el diseño e implementación del sistema de generación 116
Tabla 12: Procesos bioquímicos y sus expresiones cinéticas consideradas en el modelo. Se destacan los nuevos procesos; el resto permanecen como en ADM1 (la absorción de azúcares no se considera un proceso nuevo, pero se modifica con respecto al ADM1 original). Fuente: (García-Gen et al., 2013) 124
Tabla 13: Composición y caracterización de las heces humanas. 126
Tabla 14: Parámetros de simulación y operación de digestor. 127

2. Introducción

El biogás es un producto natural que se genera en la nauraleza debido a la descomposicion aerobia o anaerobia de los desechos que se producen debido a la acción humana o animal. Este biocombustible esta compuesto por una porcion de metano que oscila entre 50% y 70% en volumen, ademas de otros gases como dioxido de carbono, nitrogeno, oxigeno, e hidrogeno presentes en menor cantidad. Su poder calorifico varia entre 18,8 y 23,4 [$MJ/\boldsymbol{m^3}$] y se puede usar para diferentes aplicaciones como por ejemplo para generar energía electrica mediante turbinas o plantas generadoras y para combustible directo de equipos industriales como hornos o calderas, hogares o ciertos medios de transporte como autos y buses.

Ahora este tipo de gas se puede extraer de variadas formas en donde destacan dos principales, la digestión aerobica y la digestión anaerobica. Para este estudio se centrara principalmente en la digestión anaerobica debido a temas de menor complejibilidad y eficiencia. La digestión anaerobica es la biodegradación de la materia inerte mediante la acción de microorganismos en ausencia de oxigeno. Para esto lo que se pretende es diseñar un reactor junto con un mecanismo en donde se puedan cultivar estos inoculos y alimentarlos con desechos humanos para de esta forma generar biogas y almacenarlo o utilizarlo directamente en las funciones que se requieran.

Ademas junto con esto se pretende diseñar un tipo de baño “seco” especial para poder almacenar y servir como alimentación para nuestro sistema generador de biogas, en donde se utilice la menor cantidad de agua posible y se generen lodos inertes libres de patogenos para luego usarlos como una especie de abono para la tierra.

Este proyecto nace ante la necesidad de encontrar otras fuentes de energía para la matriz energetica y ademas nuevas formas de tratamiento de residuos en las plantas de aguas servidas, con el fin de extraer algun beneficio de todos nuestros desechos y poner un fin al estigma que tiene este tipo de sustancia la cual eliminamos todos los días. Ademas de otorgar beneficios a las personas que no pueden acceder a ciertos servicios basicos y que viven en las zonas perifericas de las ciudades.

2.1. Problematica

Actualmente nos encontramos viviendo una situación en la cual la humanidad nunca creyo enfrentar. El creciente calentamiento global producido por el abuso de los combustibles fosiles durante decadas en la historia humana esta pasando la cuenta de una manera drastica y repentina. Se estima que las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente 1,0 °C con respecto a los niveles preindustriales, con un rango probable de 0,8 °C a 1,2 °C. Es probable que el calentamiento global llegue a 1,5 °C entre 2030 y 2052 si continúa aumentando al ritmo actual **(IPCC, 2018).** De ocurrir este escenario la humanidad se vería enfrentada a graves problemas como, por ejemplo, el aumento en 2 metros del nivel del mar, lo cual dejaría ciudades inundadas, la desaparición del 99% de los arrecifes de coral **(ONU, 2019),** climas extremos en diferentes partes del mundo, en conjunto con una mayor ocurrencia de desastres naturales como incendios o huracanes que en un futuro acabaran con el 80% de los bosques nativos **(National Geographic, 2020).** Es por eso que se necesita con urgencia la transición a las energías renovables para lograr un 0% de emisiones de dióxido de carbono para el año 2050 y detener el avance del cambio climático antes que sea muy tarde.

En Chile ya se estan observando los efectos del llamado cambio climatico. Las temperaturas extremas en diferentes puntos del país estan en aumento y son mas comunes cada año. Esto no solo afecta a las personas sino tambien al medio ambiente en conjunto con su flora y fauna. Un aumento en la temperatura conlleva no solo problemas para la vida cotidiana sino tambien genera diversas catastrofes naturales como incendios forestales de gran envergadura que amenazan las areas verdes protegidas a lo largo del territorio que ayudan a combatir la erosión, o la dura sequía que azota al País desde principos del siglo XXI. Particularmente esta ultima esta dañando esta afectando gravemente los ecosistemas y regiones a lo largo de la zona norte-centro del país. Las altas temperaturas debido al cambio climatico estan generando una escazes en las precipitaciones a lo largo de todo Chile, las principales cuencas fluviales son las mas afectadas por esto, viendose disminuido sus caudales en mas de un 50% desde el año 1990 **(Diario El Mecurio, 2019).** Esto a su vez influye tanto en las condiciones de vida humana como en sus proyectos. La sequía es el principal causante del llamado estrés hidrico, el cual se define como el efecto que se produce

cuando la demanda de agua es mas alta que la cantidad de agua disponible en un periodo de tiempo **(GrupoInesta, 2019),** afectando de manera muy adversa la agricultura y extracción de agua potable para fines urbano y rurales a nivel mundial. Según un estudio entregado por el "Center for Climate and Resilience Reaserch" (CR)2 de la universidad de Chile en el año 2019, Chile ocupa el lugar 18° en la lista de los paises con mas estrés hidrico en el mundo. Esto significa que las fuentes de agua dulce alrededor del territorio se estan agotando cada año y que se llegara a un punto en que el agua necesaria para los diferentes usos de consumo humano debera ser racionada y no podra ser repartida hacia todos los rincones del país, dejando a muchas familias que viven hoy en día en los sectores rurales o perifericos sin acceso a este recurso indispensable y tan necesario para sobrevivir. Y no solo la humanidad se vera afectada con esto, tambien la flora y fauna a nivel mundial. Se estima que la sequía a afectado a 50.000 animales tan solo en la región de Valparaíso y ha provocado que muchas zonas con areas verdes se marchiten debido a la falta del recurso hidrico **(Iagua, 2019)**.

Esto a su vez afecta de manera severa el sistema de saneamiento urbano y por sobre todo el rural. Hasta el año 2017 se estima que mas de 673 millones de personas alrededor del planeta aun practican la defecación al aire libre y aproximadamente el 25% de la población mundial no cuenta cuenta con un sistema basico de saneamiento **(ONU-OMS, 2018).** Si bien el saneamiento humano no es un tema que se trata a menudo debido al presente taboo y mal información que se tiene de los residuos humanos, pero es claro que las heces humanas son los desechos que una persona evacua casi todos los días debido a la ingesta de aliemento en conjunto con las reacciones que se llevan a cabo al interior del cuerpo humano. Pero que muchas veces sino se trata de una forma correcta puede provocar graves daños al ambiente y a la salud humana. La excreta humana tiene un alto porcentaje de patogenos perjudiciales para los seres vivos que provocan enfermedades mortales como por ejemplo el cólera, la hepatitis o la fiebre tifoidea. Es por eso que si no se trata de la forma adecuada puede generar graves problemas en una comunidad. Actualmente la forma mas utilizada para transportar y tratar los residuos humanos son mediante agua, utilizando sistemas de alcantarillados que llevan toda la carga fecal humana proveniente de los inodoros convencionales hacia las plantas de tratamiento de aguas servidas en donde es neutralizada mediante diferentes procesos quimicos **(ONU-OMS, 2018)**. Sin embargo aunque este es un sistema factible para el tratamiento de las heces humanas, el gasto energetico y del recurso hidrico es elevado y muchas veces no es 100% eficiente para reducir la carga patogena

presente en los desechos que muchas veces son reubicados en zonas costeras o vertederos los cuales generan graves problemas medioambientales.

Al utilizar una gran cantidad de agua para este fin, se producen muchas perdidas de este recurso las cuales debido a la sequía son de carácter critico para la población. Anualmente se estima que por hogar se pierden 200.000 litros de agua en terminos de saneamiento e higiene lo que muchas veces hace parecer que este sistema es deficiente y mas que entregar algun beneficio funciona muchas veces como opción rapida para desahcerse de los residuos. Estos problemas se notan mas en las zonas de escasos recursos o rurales en donde no se cuenta con un adecuado sistema de saneamiento e higiene, llevando asi a generar graves problemas de salud hacia las personas y el ecosistema en donde se encuentran.

Es en este contexto en donde surge la idea de un sistema de sanitización que no funcione en base al uso de agua y que ademas permita extraer algun beneficio de los propios desechos. Es por eso que en este trabajo se propone un nuevo sistema de saneamiento el cual es amigable con el medio ambiente, no requiere de un consumo de energía y permite mejorar los procesos de higiene y tratamiento de los residuos no solo biologicos sino tambien los diferentes tipos de residuos que genera la actividad humana y asi enfrentar la sequia y el calentamiento global utilizando un sistema sustentable y autonomo que no emite gases de efecto invernadero y proporciona de las necesidades basicas para vivir.

3. Estado del Arte

3.1. Estado Actual del Recurso Hidrico

El 70% de la superficie de la tierra esta cubierta por agua, en donde solo el 2,5% corresponde a agua dulce y de ese porcentaje solo el 0,62% esta disponible para el consumo humano. Actualmente somos mas de 7.000 millones de personas en el planeta y se espera que el numero aumente a 9.000 millones para el año 2050, en donde ya sera un desafío mucho mayor poder acceder a este tan valioso recurso **(País Circular, 2019)**. Hoy en día mas de 600 millones de personas en el mundo no tienen acceso a agua potable tanto para consumo como para utilizarla en otros usos. Este valor corresponde a un 10% de la población mundial. En donde la mayoría de estas personas viven en zonas rurales o alejadas de la sociedad (OMS, 2015). A esto hay que agregarle que mas de 2.000 millones de personas viven en países que se encuentran con un alto indice de estrés hidrico, en donde no se tiene una correcta gestión de este recurso y en donde las consecuencias del cambio climatico estan afectando seriamente las principales reservas de agua dulce debido a la escazes de precipitaciones y el avance de la erosión **(ONU, 2019)**.

En Chile la situación actual no es muy alentadora. De acuerdo a un listado elaborado por el “World Resources Institute” señalo a Chile como una de las naciones con mayores posibilidades de enfrentar una disminución en los suministros de agua dulce debido al alza de las temperaturas y escazes de las precipitaciones. Según el listado el país se encuentra en el puesto 24° de los países que enfrentaran un estrés hidrico extremadamente alto a partir del año 2014, el unico país latinoamericano en esta condición **(País Circular, 2019)**.

Junto con esto cabe mencionar que la sequía presente en Chile ha mermado de manera considerable las reservas de agua en la zona centro-norte del país. Se estima que los tranques y rios han perdido mas del 50% de su capacidad en los ultimos 30 años. Todo debido al mal gestionamiento del uso del agua y el cambio climatico que esta azotando las regiones.

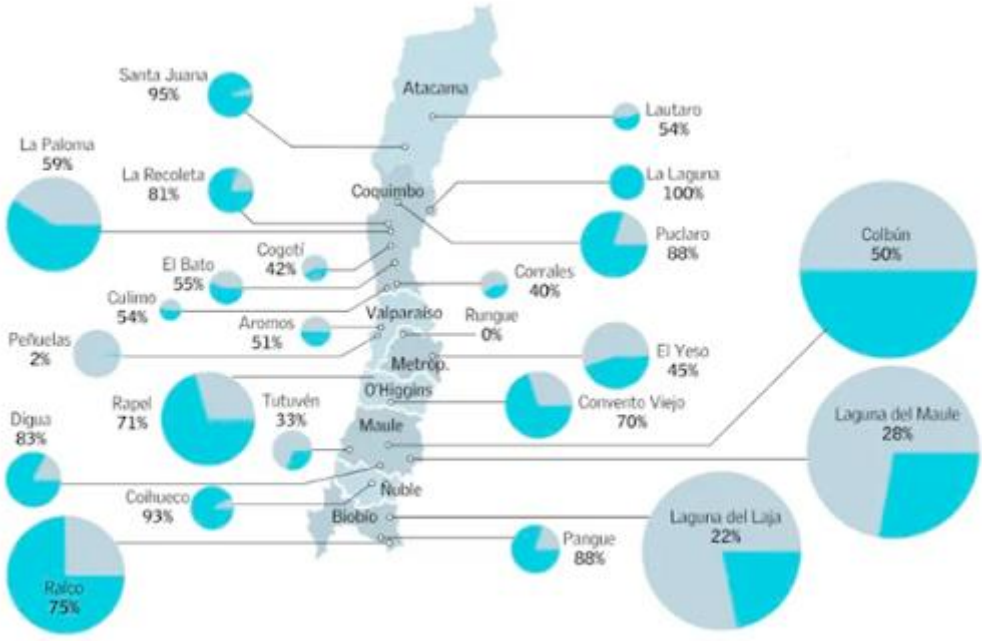


Figura 1: Mapa de la sequía en Chile por región. Fuente: (El Mercurio, 2019).

En la Figura 1 tanto se puede observar como se ha reducido la capacidad de las principales reservas de agua dulce para consumo humano en las diferentes regiones del país. Esto se produce porque se ha generado un deficit promedio de alrededor de un 30% de lluvias en los ultimos 10 años **(UCH, "Cambio climatico y megasequía", 2015)**. En donde el principal culpable es el cambio climatico y las elevadas temperaturas que se han tenido en la ultima decada, generando menos cantidad de glaciares en la cordillera y aumentando el consumo indiscriminado en la agricultura y las industrias debido al aumento de la demanda alimenticia y energetica. No obstante se estima que alrededor del 44% de los problemas hidricos que se tienen actualmente son ocasionados por fallas en la gestión del agua ysu gobernanza. Mientras que un 17% es ocasionado por el aumento de las actividades productivas y un 14% por el uso de productos quimicos o algun tipo de contaminación emitida hacia las reservas de agua.

Además no solo las reservas artificiales se estan agotando, sinno tambien las reservas naturales como los ríos que alimentan los tranques y napas subterraneas han presentado una notable disminución en sus caudales.

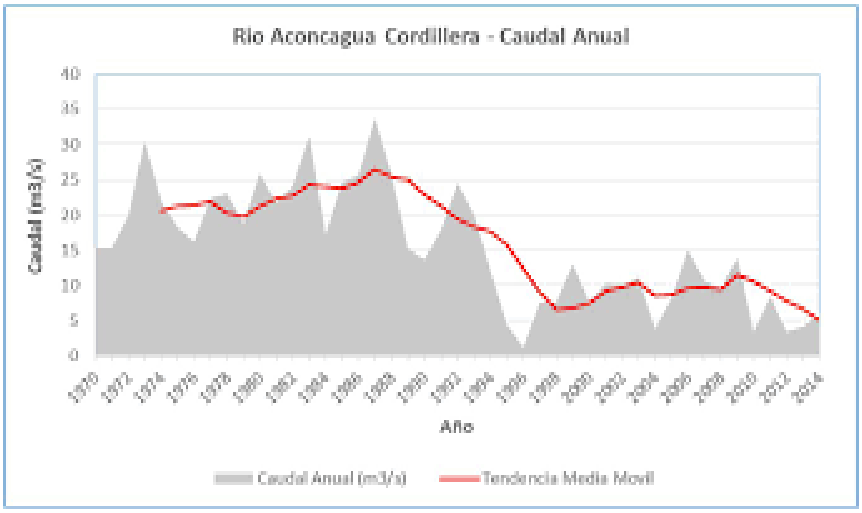


Figura 3: Historial del caudal anual Rio Aconcagua. Fuente: (ODEPA, 2016).

Por ejemplo en la Figura 3 se muestra la disminución del caudal del Rio Aconcagua que es el mas importante para la quinta regíon de Valparaíso y que es el encargado de abastecer de agua a muchas ciudades y poblaciones rurales. Esto se debe principalmente por la escazes de precipitaciones que se viven hoy en día y por el consumo excesivo de la agricultura local, que se se ve reflejado en la Figura 4.

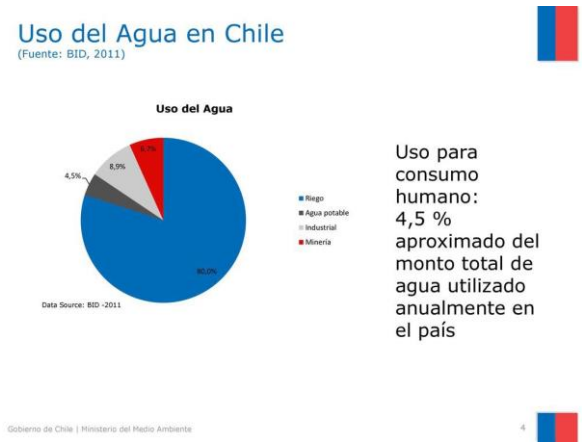


Figura 4: Usos del Agua en Chile. Fuente: (BID, 2011).

Ahora por que se hace importante hablar sobre el estado de este recurso en general. Basicamente se tiene que para temas de saneamiento actual, se utiliza como elemento principal para evacuar los desechos el agua. Pero muchas veces aunque cumple la función de eliminar correctamente las heces y orina humana, el gasto hidrico que conlleva este

proceso es muy elevado. Por ejemplo en una casa con 5 personas se tiene que el gasto de agua diario es de alrededor de 200 litros solamente por accion del inodoro, lo que representa el 35% del consumo de agua en el hogar, y muchas veces en países donde no se tiene esta cantidad de agua o simplemente no se tiene el acceso a este recurso, se hace imposible utilizar este sistema como metodo de saneamiento para los residuos humanos de cada día **(Oliden, C, Tesis UTFSM, 2020).** Y esto es aun mas dificil para las zonas rurales que no cuentan con un sistema de saneamiento urbano. Es por esto que se hace vital el desarrollo de un nuevo metodo para manejar la higiene y el saneamiento humano utilizando la menor cantidad de agua posible.

3.2. Sistemas de Saneamiento

3.2.1. Panorama Actual

Hoy en día existen diferentes formas de almacenar, transportar y tratar todos los residuos del ser humano, pero uno de los mas dificiles y que mas objeto de discusiones ha traido son los propios desechos biologicos de las personas. Las heces y orina humana son uno de los residuos con mayor indice de peligrosidad en el mundo, esto debido a la gran variedad de alimentos y sustancias que consumimos diariamente. El ser humano al ser omnivoro y haber desarrollado un sinfín de alimentos artificiales y medicamentos con componentes altamente toxicos para muchos ecosistemas, desarrolla desechos que tienen un alto contenido de patogenos perjudiciales para la salud de los seres vivos. Estos patogenos son los causantes de diferentes tipos de enfermedades mortales para la raza humana como por ejemplo la disentería, la hepatitis A, el colerá, la diarrea, entre otras. Se estima que unas 842.000 personas mueren anualmente debido a estas enfermedades que ocurren por el mal manejo de la higiene particularmente de los desechos humanos, debido a un mal saneamiento de estos **(OMS, 2019).**

Actualmente según datos entregados por la Organización Mundial de la Salud, en el año 2015 el 39% de la población mundial utilizaba un servicio de saneamiento gestionado de forma segura, es decir sus que sus excrementos se eliminaban de forma segura o se sometian a un tratamiento en otro lugar. El mas utilizado en este caso es el que la mayoria conoce como el sistema de alcantarillados. Este sistema consiste basicamente en una colección de ductos

conectados por tuberías que recogen las heces evacuadas en los inodoros de los hogares y las transportan utilizando agua hacia la red de alcantarillados para luego ser trasladados hacia las plantas de aguas servidas en donde se eliminan los residuos solidos y se purifica el agua para reutilizarla.

Otros datos otorgados por la OMS son que alrededor del 68% de la población mundial utiliza al menos un servicio basico de saneamiento. Pero en la otra cara de la moneda se tiene que aun hay 2.300 millones de personas que siguen sin tener instalaciones de saneamiento basicas para administrar sus desechos, en donde 892 millones todavia defecan al aire libre lo que produce una alta tasa de mortalidad en los países con menos recursos y ademas ocasiona muchas veces la contaminación de las napas subterraneas o rios circundantes a esas zonas **(OMS, 2019).**

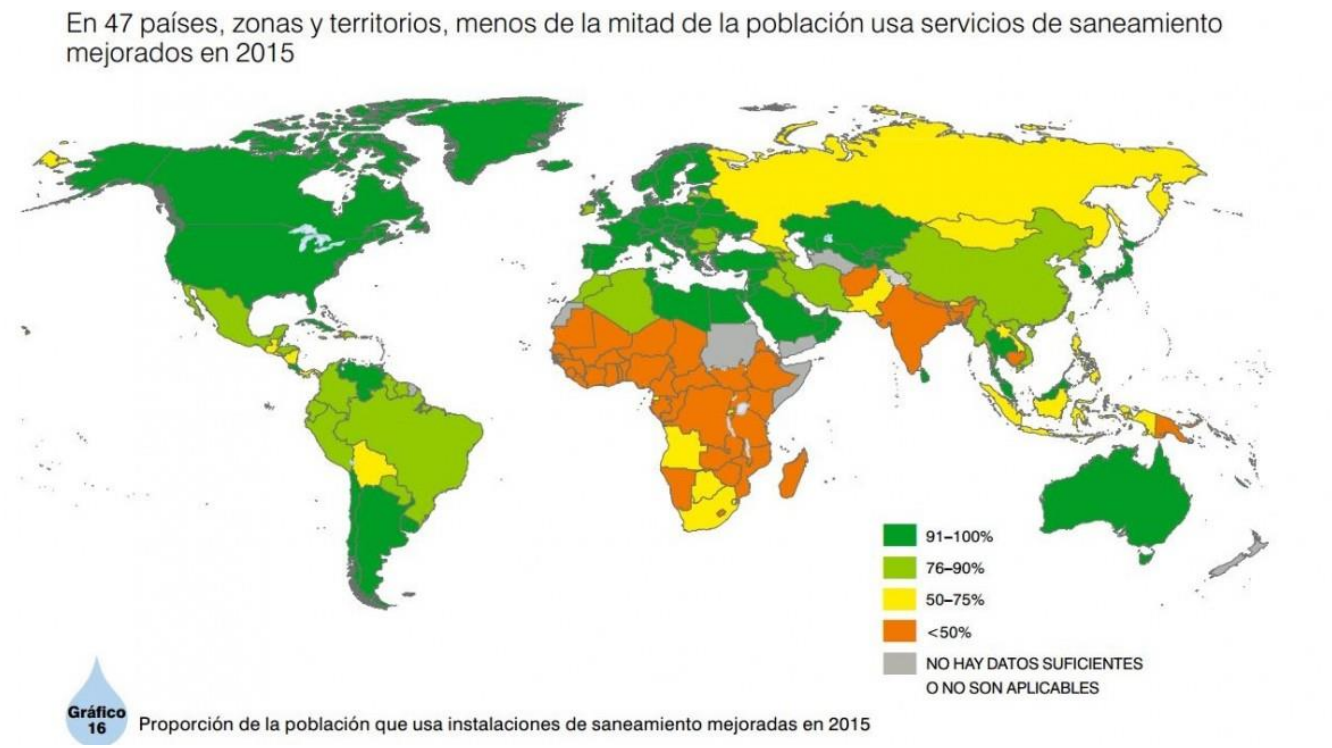


Figura 5: Proporción de la población mundial que tienen acceso a método de saneamiento. Fuente: (Unicef, 2015).

En la figura se aprecia el panorama mundial en terminos de saneamiento. Como se puede ver las zonas con menos servicios de saneamiento se encuentran en el continente asiatico y africano, debido a sus bajos niveles de ingreso per capita y una mayor cantidad de población

rural. Para el caso de America Latina solo Chile supera el 75% de saneamiento seguro mientras que los demas países, aunque han presentado mejorías con años anteriores, aun no logran superar los indicies de seguridad adecuados establecidos por la ONU **(UNICEF, 2015)**.

Pero lo anterior no significa que no se tienen que tomar cartas en el asunto con respecto al país, ya que aun quedan miles de familias sin acceso a a los servicios basicos que se requieren para tener una vida de calidad. A continuación se presentan los diferentes beneficios que se presentan si se logra desarrollar un sistema optimo y de carácter universal de saneamiento:

- la reducción de la propagación de las lombrices intestinales, la esquistosomiasis y el tracoma, enfermedades tropicales desatendidas que provocan sufrimiento a millones de personas;
- la reducción de la gravedad y las consecuencias de la malnutrición;
- la promoción de la dignidad y el aumento de la seguridad, especialmente entre las mujeres y las niñas;
- la promoción de la asistencia a la escuela: la asistencia de las niñas a la escuela se ve potenciada especialmente por el establecimiento de instalaciones de saneamiento separadas.
- el potencial de recuperación de agua, energía renovable y nutrientes de los desechos fecales.

En un estudio de la OMS de 2012 se calcula que cada dólar invertido en saneamiento produce un rendimiento de US$ 5,50, traducido en menores costos de atención de salud, más productividad y menos muertes prematuras. Es por eso que se hace necesario desarrollar un sistema que recolecte todas estas propuestas y fomente el desarrollo social y económico de un sector **(OMS, 2019).**

3.3. Microorganismos Patogenos.

Anteriormente se menciono que los desechos humanos son uno de los residuos biologicos con mayor carga viral y bacteriana en la naturaleza y es por eso que se hace necesario un tratamiento adecuado para prevenir cualquier tipo de infección o contaminación de los recursos naturales. El principal riesgo que existe actualmente es que una mala disposición de

nuestros desechos contaminen las principales fuentes de agua en una zona determinada, ya que de suceder, podría ocurrir una emergencia sanitaria debido a que los patogenos presentes en las heces son los causantes de diferentes tipos de enfermedades mortales que de no ser controladas podrian llegar a ocasionar serios problemas de salud en la población. Un ejemplo de esto ocurre en ciertos países con bajos indices de calidad de vida, en donde existe un gran numero de personas que evacuan sus residuos cerca de rios o napas subterraneas, cuya agua se utiliza para diferentes usos como la agricultura o el consumo humano directo. Esto lleva a que las bacterias se desarrollen en los alimentos ingeridos por las comunidades y que posteriormente desarrollen enfermedades las cuales debido a su condición de vida generalmente son mortales.

Estos microorganismos se componen principalmente por bacterias, virus y protozoos que se generan en los excrementos y que de entrar en contacto con el organismo humano generan diversos tipos de enfermedades. Entre estos patogenos se encuentran por ejemplo la Salmonella, Aeromonas spp, Escherichia coli, Calicivirus, Adenovirus, Coxsackievirus, Hepatitis A, Cryptosporidium, Rotavirus, entre otros.

Es por eso que se hace vital el tratamiento y la inactivación de los patogenos en los lodos residuales para de esta forma poder neutralizar la proliferación de estos y disminuir el riesgo de enfermedades. Cabe destacar que para poder realizar este proceso es necesario tener en cuenta diferentes factores y parametros de operación de cada tratamiento, como por ejemplo la temperatura, el pH, la cantidad de oxigeno, humedad, tipo de suelo, etc. En donde cada metodo va a necesitar diferentes condiciones para funcionar de manera optima y reducir la mayor cantidad de carga viral.

Microorganismo	Enfermedad
Protozoos	
Crytosporidium	Criptosporidiosis
Giardia lamblia	Giardiasis
Entamoeba histolytica	Disentería amebiana
Naegleria fowleri	Meningo-encefalitis amébica
Virus	
Hepatitis A	Hepatits
Adenovirus	Enfermedades respiratorias y conjuntivitis
Enterovirus, coxsackievirus, ecovirus y virus de la poliomelitis	Enfermedades respiratorias, Poliomelitis
Reovirus	Gastroenteritis
Virus Norwalk	Diarreas y vómitos
Rotavirus	Diarreas
Bacterias	
Salmonella typhi	Fiebres tifoideas
Salmonella paratyphi	Fiebres paratifoideas
Salmonella schottmuelleri	Fiebres paratifoideas
Salmonella spp	Salmonelosis
Shigella spp	Disentería bacteriana (shigelosis)
Campylobacter jejuni y *Campilobacter enteritis*	Gastroenteritis
Escherichia coli	Gastroenteritis
Yersinia enterocolitica	Yersiniosis
Vibrio cholerae	Cólera
Legionella pneumophila	Legionelosis/enfermedad del legionario
Leptospira	Leptospirosis
Pseudomonas aeruginosa	Diversas infecciones

Figura 6: Microorganismos del agua y enfermedades hídricas. Fuente: Moro (2011)

3.4. Alternativas de Saneamiento

Hoy en día existen diversos metodos de saneamiento a nivel mundial. El mas usado es el de los inodoros convencionales que utilizan agua como fluido principal para transportar las heces y la orina a traves de un sisterma de alcantarillados que desemboca en una planta de tratamiento de aguas servidas. Este sistema es utilizado por alrededor del 40% de la población mundial **(OMS, 2019)**. Luego vienen los otros metodos de evacuacion In Situ como lo son las fosas septicas, letrinas sanitarios y baños secos o ecologicos.

En este trabajo en particular hablaremos de los baños secos. El baño seco o ecologico es un tipo de sistema de saneamiento seco que no utiliza un fluido para el transporte de los desechos y ademas plantea una separación entre las heces y la orina para un mejor manejo y posterior tratamiento de los excrementos. Así de esta forma mejorar las condiciones de higiene y evitar cualquier alglomeración de patogenos potencialmente perjudiciales para la

salud humana.

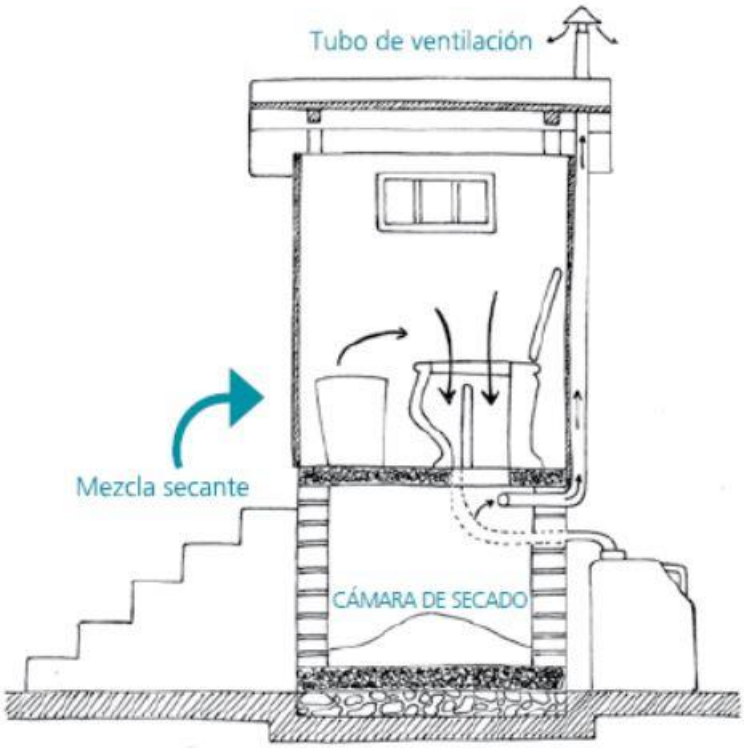


Figura 7: Esquema de un Baño seco. Fuente: (Manual de construcción de baño ecológico, 2018).

En la figura se muestra basicamente el funcinamiento de este tipo de metodo de saneamiento, en donde existen dos camaras por donde ingresa tanto la orina como las heces. Estas ultimas son almacenadas en una camara especial en donde se procede a su deshidratación para asi neutralizar los patogenos y aplicar diferentes tipos de tratamiento para su posterior evacuación o reutilización en caso de ser posible. Tambien se hace viable aplicar la digestión anaerobica a los desechos obteniendo asi biogas para diferentes aplicaciones dentro del hogar.

Como se puede observar este tipo de baño esta siendo muy utilizado en las zonas rurales debido a su escaso uso de agua que no muchas veces es accesible en estas localidades y al nulo uso de energía externa. Además que este metodo mejora drasticamente el hecho de defecar a la intemperie, evitando asi posibles enfermedades que pongan en riesgo la salud de las personas.

Ultimamente se ha visto un incremento en el desarrollo de tecnologías que se dedican a desarrollar nuevos metodos de saneamiento. Particularmente existe un proyecto liderado por la Universidad de Cranfield en aras de una campaña iniciada por la fundación Bill&Melinda Gates llamada “Reinvent the Toilet Challenge”, en donde se basan en la idea del baño ecologico para desarrollar un sistema altamente competente con las demandas actuales y que no solo funciona como receptor de los desechos humanos, sino tambien extrae un beneficio a partir de ellos, utilizando un proceso quimico presente en la naturaleza llamado digestión anaerobica, en donde se extrae el llamado “biogas” de las heces humanas y se utiliza como fuente de energía para diferentes usos como por ejemplo calefacción del hogar, generación de electricidad o para generar alimentar motores de combustión en vehiculos motorizados.

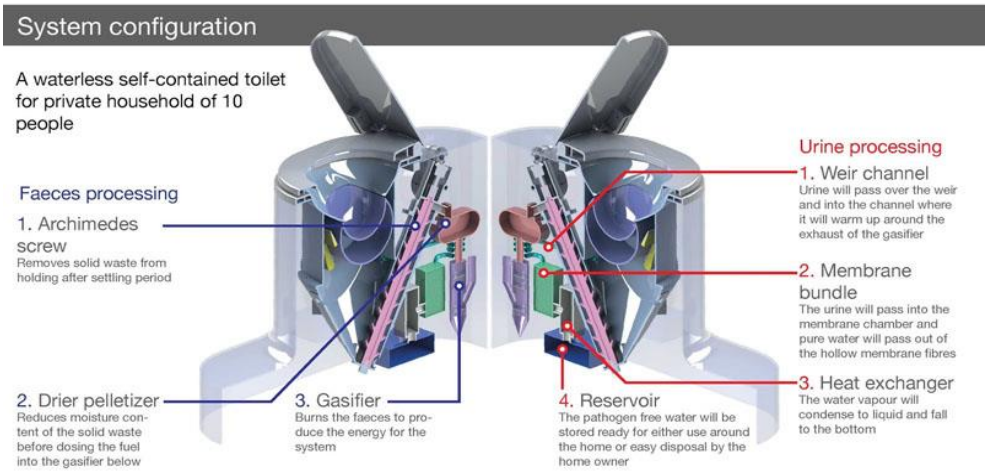


Figura 8: Prototipo de baño seco diseñado por la Universidad de Cranfield. Fuente: (The nano membrane toilet, 2019).

En un sistema de saneamiento debe ir incluido un metodo de tratamiento de los residuos evacuados. Para el caso de las heces humanas se dificulta la tarea debido a la toxicidad que estas poseen y la elevada carga patogenos portadores de enfermedades que contienen. Para el caso del baño seco se tienen los siguientes metodos de tratamiento.

3.4.1. Secado Termico

También llamada deshidratación, se utiliza el secado al calor para evaporar y separar el agua de los lodos fecales. El secado térmico es aplicado actualmente para lodos de diferentes orígenes. El secado térmico reduce el peso y el volumen, ya que el agua se pierde en forma de vapor. Se aumenta la temperatura de los lodos por medio de energía transferida de una fuente externa de calor, que permite la evaporación del agua libre a la superficie del lodo, a una tasa que depende de la temperatura del aire ambiental, la humedad, la presión y flujo, además de la extensión expuesta de lodos. A medida que se sigue transfiriendo calor, la humedad interna se traslada a la superficie y se evapora a una tasa que depende de las características físicas de los lodos, su temperatura y su humedad **(Manejo de Lodos Fecales, 2014)**.

3.4.2. Compostaje

El compostaje es un proceso controlado por medio del cual ocurre la descomposición biológica de la materia orgánica por acción de los mismos organismos que lo hacen naturalmente en el suelo. El producto final es un material oscuro, similar a humus, con muchos nutrientes y sirve para mejorar los suelos. Se define el humus como la porción estable de la materia orgánica del suelo, lo que queda después que la mayor parte de los residuos vegetales y animales se hayan descompuesto. Los mecanismos más importantes que regulan este proceso incluyen la oxidación de los compuestos orgánicos, la liberación e inmovilización de nutrientes y la síntesis microbiana de nuevos compuestos **(Manejo de Lodos Fecales, 2014)**.

El compostaje termofílico es un proceso de tres fases. Durante la primera fase, las bacterias multiplican rápidamente al consumir los compuestos de fácil degradación (p.ej., azúcares, almidones, proteínas). La temperatura también aumenta debido a la alta tasa de crecimiento (y reacciones catabólicas exotérmicas) y el calor no avanza escapar tan rápidamente. En la segunda fase, se logran temperaturas termofílicas de 50 a 75°C y las bacterias termofílicas se vuelven activas, descomponiendo aún más la materia orgánica. Durante esta fase, las altas temperaturas reducen los patógenos y matan a las semillas de plantas (p.ej., malezas). En la

tercera fase, se cumple con la estabilización al agotar los sustratos fácilmente biodegradables, la actividad bacteriana disminuye y la temperatura se reduce. En esta última fase, las actinobacterias y los hongos continúan a degradar las moléculas más resistentes, como la celulosa y la lignina **(Manejo de Lodos Fecales, 2014)**.

3.4.3. Tratamiento Aerobio

Los ambientes aeróbicos cuentan con la presencia de oxígeno y los organismos aeróbicos dependen del oxígeno para su respiración. Los microorganismos pueden ser aeróbicos obligados o facultativos, lo que quiere decir que estos últimos también pueden sobrevivir en condiciones anaeróbicas. Los procesos aeróbicos más comunes en el tratamiento de aguas servidas incluyen lodos activados, reactores secuenciados discontinuos, filtros percoladores (trickling filters) y las lagunas facultativas o de maduración. Los procesos aeróbicos suceden en todo proceso sólido o líquido donde existe oxígeno, incluyendo los lechos de secado y el compostaje de lodos fecales. **(Manejo de Lodos Fecales, 2014).**

3.4.4. Incineración

Basicamente como lo dice su nombre, consiste en la quema de los residuos al interior de una camara mediante un metodo de combustión externo. Esta tecnica asegura la eliminación completa de los patogenos presentes en las heces humanas, al someterlos a una temperatura de sobre 400 grados celsius **(Manejo de Lodos Fecales, 2014).**

3.4.5. Digestión Anaerobica:

El procesos anaerobio es quel en que se efectua la degradación de la materia organica en ausencia de oxigeno molecular mediante inoculos de diferente naturaleza y que son sensibles al oxigeno. Estos agentes se encargan de ir degradando la materia organica para producir biogas a traves de diferentes etapas **(Guerrero, L; Montalvo, S, 2003).**

El proceso de digestión anaerobia se emplea principalmente en el tratamiento de residuos solidos o liquidos, cuando la concentración de materia organica es tan elevada que no resulta economico el tratamiento aerobio. Este ultimo cumple la misma función que la digestión

anaerobia pero en este caso si es vital la precencia de oxigeno en las reacciones. Cabe destacar tambien que este procesos no son artificiales o de aplicación humana, sino que ocurren constantemente en la naturaleza.

¿Por qué se usa la digestión anaerobia por sobre la aerobia? La ventaja principal de los procesos anaerobios con relación a los aerobios se fundamenta en la transformación de la materia organica a traves de una tecnología de bajo consumo energetico. A continuación se señalan las principales ventajas del proceso anaerobio por sobre el aerobio:

Tabla 1: Digestión Anaerobia vs Digestión Aerobia

Aspectos	**Digestión Anaerobia**	**Digestión Aerobia**
Usos de la energía	Durante los procesos anaerobios casi el 90% de la energía que existe originalmente en el sustrato se retiene en el biogás, perdiéndose solo un 7% como calor en la reacción.	En los procesos aerobios cerca del 60% de la energía se consume durante la síntesis de biomasa y el 40% de la energía se pierde en forma de calor de reacción.
Generación de Biogás	En los procesos anaerobios cerca del 95% del sustrato pasa a convertirse en biogás y el 5% se transforma en biomasa.	Durante los procesos aerobios cerca del 50% del carbono contenido en el sustrato se convierte en biomasa y el otro 50% pasa a dióxido de carbono.

Consumo de energía Externa	En los procesos anaerobios se consume mucho menos energía externa, fundamentalmente eléctrica de otros equipos anexos a las reacciones.	Muchas veces se necesitan equipos complejos de gran consumo energético para poder producir el biocombustible.
Generación de Lodos	Una vez terminado el proceso anaerobio se generan del 10% al 30% de lodos (biomasa) que se producen en los aerobios lo que disminuye considerablemente los costos finales de disposición.	Se produce una cantidad elevada de biomasa una vez obtenido el biogás que no siempre es tratable o reutilizable para otros usos como por ejemplo de fertilizante.
Emisión de contaminantes atmosféricos	En la digestión anaerobia no se producen gases o sustancias contaminantes para el medio ambiente o la atmosfera.	Es posible que se produzcan ciertos tipos de aerosoles potencialmente peligrosos para el ambiente circundante en donde se encuentra el sistema de tratamiento.
Estabilización de lodos	La aplicación de un proceso anaerobio puede mejorar la sedimentabilidad de los lodos y neutralizar una mayor cantidad de patógenos presentes en la biomasa.	No se logra una calidad óptima de biomasa para para su posterior tratamiento y es muy pocas veces reutilizable para otros procesos debido a su alto nivel de patógenos.

Ahora para poder generar biogas mediante un proceso de digestión anaerobia se necesitan ciertos elementos indispensables en donde destaca un reactor o biodigestor en donde

ocurren todas las reacciones quimicas, un sustrato que en este caso serian los desechos organicos de humanos, animales o plantas y un inoculo o microorganismo que pueda descomponer la materia en diferentes tipos de productos. Todo el proceso de biodegradación de divide en 4 etapas **(Guerrero, L; Montalvo, S, 2003).**.

- Hidrólisis: La hidrolisis o rompimiento por agua es una reacción quimica consiste en la ruptura de las cadenas largas de materia organica en otras mas cortas obteniendose de esta forma productos intermedios. Esto se produce mediante la acción de bacterias hidroliticas que hidrolizan las moleculas solubles en agua, tales como grasa, proteinas y carbohidratos para tranformarlos en polimeros mas simples. Durante esta etapa se produce CO2.

- Acidogénesis: En esta fase se convierten los productos intermedios en acido acetico, hidrogeno y dioxido de carbono. Los inoculos que aparecen en esta etapa se denominan bacterias acidogenicas y acetogenicas, y se encargan de fermentar las cadenas complejas de la materia organica en acidos organicos simples, princialmente acido acetico.

- Acetogenesis: En esta etapa se desarrollan bacterias acetogénicas que realizan la degradación de los ácidos organicos donde los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromaticos se degradan produciendo ácido acetico, llevandolos al grupo acético CH3-COOH y liberando como productos el hidrógeno y dióxido de carbono que son los elementos precursores de las bacterias metanogénicas. Esta reacción es endoexergética,

- Metanogénesis: Es la ultima etapa en la descomposición de la materia organica en condiciones anaeróbicas. Durante este proceso, aceptores de electrones se reducen, mientras que se acumulan hidrogeno y dióxido de carbono. Aca actuan los microorganismoc conocidos como metanógenos, en donde usan este dioxido de carbono más los ácidos organicos para producir metano. En esta fase se produce el 90% del total de metano que se produce en el biodigestor. Estos inoculos ademas son los que condicionaran el tiempo de retención de la biomasa en el digestor, asi como la temperatura del proceso.

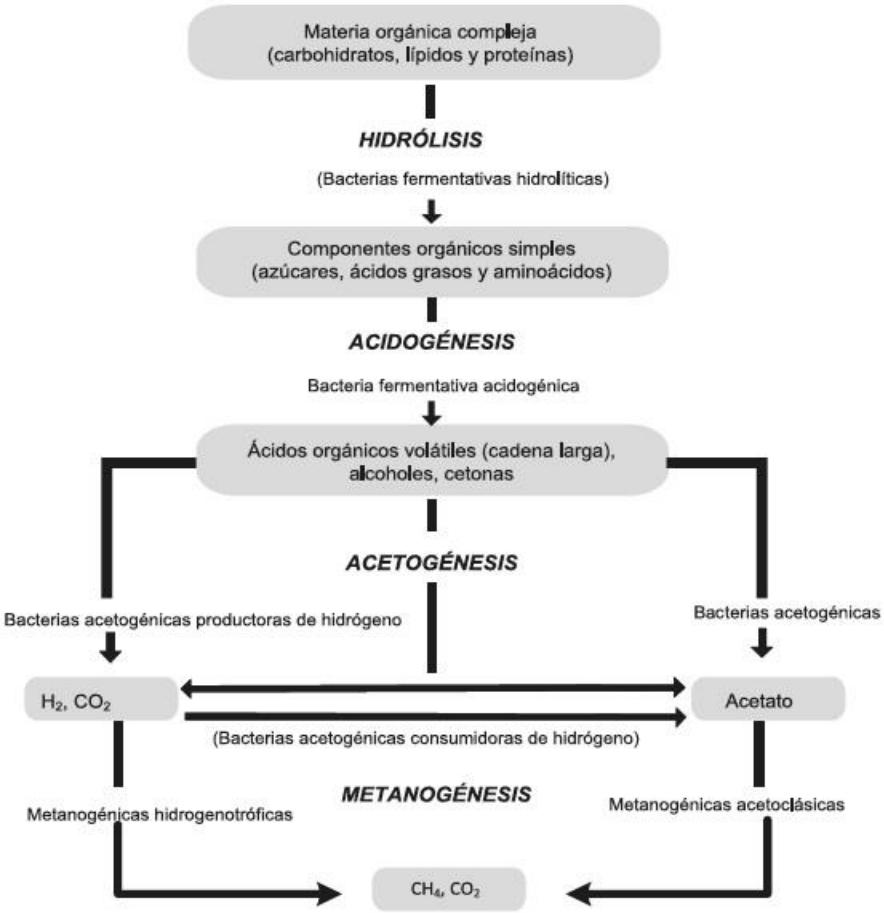


Figura 9: Etapas de la digestión anaeróbica. Fuente: (Moraes et al, 2015)

Estos son todas las reacciones y procesos que ocurren al interior del biodigestor. Pero esto es solo el procedimiento basico para poder generar biogas, ahora esta el tema de si se almacenara o se usara directamente en alguna aplicación, tambien que se hara con los residuos del proceso y como sera la alimentación al sistema en general. Todos estos aspectos van a depender de las condiciones en las que se vaya a instalar un sistema de cierta magnitud.

Para el caso de la temperatura ideal que se necesita para que los inoculos actuen de la forma mas eficiente posible, puede varíar entre 20 y 60 grados dependiendo en la fase que se encuentren, por lo que debe ser necesario tener un sistema de calefacción o algun intercambiador de calor en el reactor. Junto con esto se tiene que el porcentaje total de solidos presentes en alimentación sea entre 8% y 12% para la digestión humeda y entre 20% y 60% para la digestión seca. Ademas se debe contar con un agitador mecanico al interior del

sistema para hacer homogenea la mezcla y fomentar el crecimiento de los microorganismos, contando tambien con la suficiente carga para el aumento de su numero.

3.5. Generación de Biogas

Ahora pasemos a en detalle a descrbir los principales componentes que se necesitan para poder generar Biogas:

3.5.1. Sustrato

El sustrato corresponde a materia prima orgánica que ingresa al digestor y pueden abarcar diferentes tipos de origen y composiciones. Los más utilizados a nivel mundial en la fermentación metanógena, pueden ser residuos orgánicos de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal, urbano, doméstico u otros. Para este caso se realizará el estudio y viabilidad de los desechos humanos, ósea de heces y sus elementos adyacentes, y se estudiará su eficiencia y su posibilidad de rentabilidad en el mercado. Cabe destacar que se plantea también la posibilidad de unir diferentes tipos de sustratos para evaluar si mediante el método de Codigestión, el cual se hablara más adelante, es posible encontrar una mezcla ideal para maximizar la producción de Metano en un biodigestor.

Otro punto importante que mencionar es que el carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de los inóculos metanógenos. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Dado que los inóculos presentes en la reacción consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1, e inclusive hasta 20:1. También será necesaria la presencia de sales minerales en cierto equilibrio (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).

Como normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas, sumado a que es obligación por ley en Chile tratar estos residuos, en la digestión anaerobia estos elementos cumplen el rol de ser la materia prima principal para su alimentación, aunque en este caso no se obtendrán directamente de las plantas de tratamiento pero si es necesario se deben agregar otras sustancias que deben cumplir con los requerimientos de nutrientes necesitados. Esto implica

que el sustrato debe ser tratado previamente mediante diferentes procesos antes de poder entrar a un reactor para su posterior degradación.

3.5.2. Inóculos

Los inóculos corresponden a los microorganismos que se encargan de degradar la materia orgánica para así obtener biogás y además cumplen la función de neutralizar la mayoría de los agentes patógenos presentes en los lodos residuales. Estos microorganismos son diversos y cada grupo se encarga de cumplir diferentes funciones en las etapas del proceso anaerobio, además de proliferar en diferentes condiciones ambientales, por lo que es importante conocer y regular los diferentes parámetros que contribuyen a su crecimiento y eficiencia durante las diferentes etapas metabólicas **(Guerrero, L; Montalvo, S, 2003)**.

Los diferentes tipos de bacterias se dividen según cada etapa en el proceso de la anaerobiosis. A continuación, se muestra la clasificación de estos inóculos presentes en este proceso.

Tabla 2: Grupos de bacterias que participan en la digestión anaerobia.

Grupos	Inóculos
Grupo 1	Bacterias hidrolíticas. Son un conjunto de bacterias cuya finalidad es romper los enlaces complejos de proteínas, celulosa, lignina o lípidos en monómeros o moléculas como aminoácidos, glucosa, ácidos grasos y glicerol, los cuales pasan al siguiente grupo de bacterias. En este proceso participan principalmente Clostridium y Bacteroides
Grupo 2	Bacterias fermentativas acidogénicas. Las cuales se encargan de convertir azúcares, aminoácidos y lípidos en ácidos orgánicos, alcoholes y cetonas, acetato, CO2 y H2, siendo Clostridium el microorganismo que se encuentra principalmente realizando este proceso, aunque Lactobacillus y Bacillus, también lo hacen

Grupo 3 Bacterias acetogénicas. Estas solo se desarrollan como productoras de H2 junto a otras bacterias consumidoras de este. Syntrophobacter wolinii, especializada en la oxidación de propionato, y Syntrophomonas wolfei, que oxida ácidos grasos de 4 a 8 átomos de carbono, convierten el propiónico, butírico y algunos alcoholes en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, el cual se utiliza en la metanogénesis

Grupo 4 Bacterias metanógenicas: son aquellas bacterias capaces de generar gas metano como última fase de la digestión anaerobia descrita anteriormente.

Ahora en cuanto a la calidad y origen del inoculo, se pueden mencionar las siguientes fuentes:

1. Lodos anaerobios procedentes de un reactor que esté operando con el mismo residuo que se vaya a tratar.
2. Lodos anaerobios procedentes de distintos reactores operando con diversos residuos (mezcla de lodos)
3. Lodos anaerobios procedentes de un reactor que esté operando con sustratos complejos.

Junto con esto cabe decir que en ocasiones se mezclan lodos de diferentes procedencias para potenciar la efectividad del inoculo, lo que permite contar con un número mayor de especies bacterianas adaptadas a diversos sustratos. Esta práctica es muy ventajosa cuando se tratan residuos de difícil biodegradación o que contienen compuestos con algún nivel de toxicidad. A este método se le denomina Codigestión (**(Guerrero, L; Montalvo, S, 2003)**.

3.5.3. Biodigestor

El biodigestor o bioreactor es un equipo o sistema de acumulación de materia organica conectado a una serie vias de alimentación y evacuación de materia en donde ocurren reacciones quimicas y biologicas como por ejemplo la digestión aerobioa o anaerobica para la degradación y estabilización de los lodos residuales con el fin de obtener biogas para el

consumo humano. Basicamente consiste en un estanque cerrado hermeticamente e impermeable en donde se generan las reacciones mencionadas anteriormente conectado a otros equipos complementarios que usualmente favorecen a la producción de metano.

Existen diferentes tipos de biodigestores los cuales se encuentran subdivididos en las siguientes categorías.

3.5.3.1. Biodigestor de Flujo Discontinuo

Los biodigestores discontinuos o por lotes son contenedores cerrados que una vez cargados no permiten extraer o añadir más sustratos hasta que finalice el proceso completo de biodegradación y producción de biogás. En otras palabras, el proceso finaliza cuando no se produce más biogás. Estos tipos de digestores admiten mayor carga de materiales poco diluidos, por lo que el requerimiento de agua es menor que en los sistemas continuos. Otro aspecto a favor es que no son afectados por presencia de material pesado como tierra o arena. Al principio y al final del proceso la producción de biogás es marcadamente menor; Lo cual se debe a la carencia de condiciones óptimas para los microorganismos anaeróbicos al inicio y posteriormente al agotamiento de los nutrientes para los mismos (Sanitation and Energy, 2018)

3.5.3.2. Biodigestor de Flujo Semicontinuo

Estos biodigestores son alimentados diariamente con una carga relativamente pequeña en comparación al contenido total; Ésta se deposita en la cámara de carga, e igualmente se debe extraer de la cámara de descarga un volumen igual del efluente líquido para así mantener el volumen constante. Generalmente producen biogás casi permanentemente, gracias al suministro constante de nuevos nutrientes para las comunidades de bacterias. Una limitante importante es la disponibilidad de agua, debido a que la carga debe ser una mezcla de una parte del material orgánico y cuatro partes de agua (Sanitation and Energy, 2018).

3.5.3.3. Modelo Chino

Es originó en China y consiste en una estructura cerrada con cámaras de carga y descarga que puede ser construida de concreto armado o ladrillos. Tienen una larga vida útil (mayor a 15 años) con un adecuado mantenimiento. Sin embargo, el relativo *alto* costo que representa

la construcción de este modelo hace que no se haya popularizado en países latinoamericanos tanto como otros diseños.

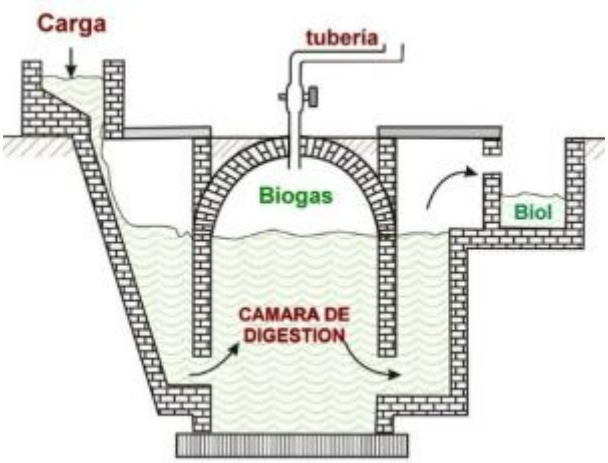


Figura 11: Biodigestor modelo chino.

El digestor almacena solo pequeño volumen del gas generado en el interior, por lo que requiere un contenedor diferente construido para tal fin (gasómetro).

3.5.3.4. Modelo Indio

También llamado de domo flotante, en su parte superior presenta una campana o domo que se mantiene flotando en el líquido a causa del biogás que retiene en su interior. El domo puede ser de metal o preferiblemente de un material resistente a la corrosión como los plásticos reforzados. Esta campana sube y baja dependiendo del volumen de gas que contiene y por esto requiere una varilla guía central o rieles laterales que eviten el rozamiento contra las paredes de la estructura.

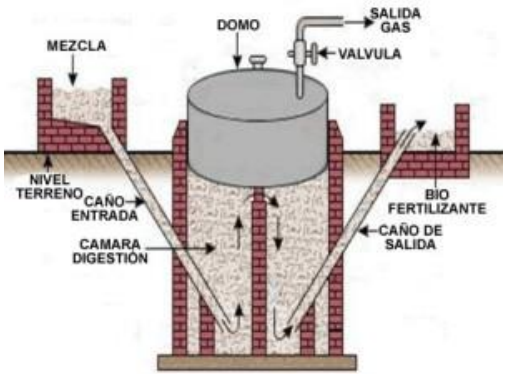


Figura 12: Biodigestor modelo indio.

Tienen la ventaja que no necesita un contenedor externo para el almacenar el gas generado. Este se mantiene a una presión relativamente constante al interior del domo, lo que es muy ventajoso. Una variación a este modelo lo constituyen los biodigestores que presentan una película de polietileno flexible en la parte superior en sustitución del domo flotante. Haciéndolos más económicos y accesibles socialmente.

3.5.3.5. Biodigestor de Flujo Continuo.

Son aquellos en donde el residuo se descarga de manera continua o por lo menos una vez al día, requiere de menos mano de obra, de una mezcla más fluida o movilizada de manera mecánica y un depósito de gas. Este tipo de reactores son los utilizados a gran escala para proyectos industriales de grandes envergaduras en donde la alimentación viene dada directamente por las plantas de aguas servidas, en donde se trabajan con caudales altos y concentraciones de solidos reducidas **(Sanitation and Energy, 2018**).

Este tipo de instalaciones esta al alza en Europa ya que cuentan con la infraestructura adecuada para este tipo de proyectos. Por ejemplo, en Alemania y Suecia existen muchas plantas de biogás que funcionan con este sistema de biodigestión.

3.5.3.6. Biodigestor de Flujo Pistón.

Son aquellos en los cuales la cámara de digestión es alargada y por lo tanto la degradación de los residuos transcurre a medida que transitan a lo largo del digestor. En esta categoría se encuentran los digestores familiares de bajo costo.

3.5.3.7. Modelo horizontal.

Es básicamente un digestor tubular horizontal en cuyos extremos se sitúan las cámaras de carga y descarga del sistema. Su configuración alargada impide que la carga líquida inicial y el efluente se mezclen; Esto lo hace útil en el aprovechamiento de residuos que requieran un tratamiento prolongado, tales como excretas humanas y ciertos desperdicios de sacrificio de animales. Los biodigestores familiares de bajo costo, populares en países en vías de desarrollo, son fáciles de implementar ya que se fabrican con grandes bolsas de polietileno

tubular. Suelen situarse dentro de una especie de trinchera y su periodo de vida útil son unos cinco años.

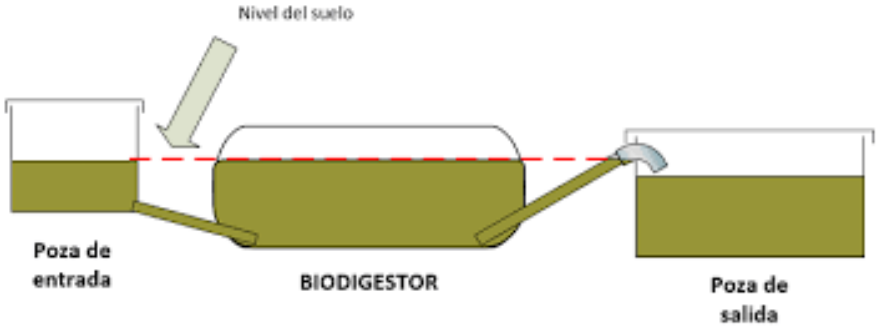


Figura 13: Biodigestor Horizontal.

3.6. Parámetros Ambientales de funcionamiento

Los parámetros ambientales que hay que controlar hacen referencia a condiciones que deben mantenerse o asegurarse para el desarrollo correcto y eficiente del proceso tanto en el laboratorio como en un reactor en funcionamiento, los cuales son:

- pH: El pH promedio va a depender de cada etapa en que se encuentre el proceso. Ya que cada etapa metabólica cuenta con diferentes tipos de bacterias que operan a determinado valores de pH, se adjunta una tabla de los valores aproximados que alcanza este parámetro en los diferentes escenarios.

pH	Tipo de microorganismo	Microorganismos encontrados
1.1 - 5.5	Acidófilos	*Lactobacillus spp* *Bifidobacterium bifidum*
5.5 - 8.0	Neutrófilos	*Clostridium perfringes* *Methanococcus sp* *Methanobacterium sp* *Propionibacterium acidipropionici*
8.5 - 11.5	Alcalonófilos	*Clostridium botulinum* *Clostridium sporongenes* *Clostridium tetani* *Fusobacterium spp* *Micrococcus spp*

Figura 14: Rangos de pH de diferentes Inóculos durante el proceso anaerobio. Fuente: (Corrales et al., 2015).

- Alcalinidad: La alcalinidad de una sustancia se refiere a la capacidad que se tiene para neutralizar ácidos. En este caso para asegurar la capacidad tampón y evitar la acidificación. Se recomienda una alcalinidad superior a 1,5 [g/l CaCO3].
- Potencial redox, con valores recomendables inferiores a 350 [mV].
- Nutrientes, con valores óptimos que aseguren el crecimiento de los microorganismos en las diferentes etapas de la metanogénesis.
- Tóxicos, inhibidores o material no degradable, cuya concentración ha de ser la mínima posible.
- Relación Carbono Nitrógeno C/N: Las bacterias metanógenas necesitan tanto nitrógeno como carbono para sus actividades metabólicas. De existir bajas concentraciones de nitrógeno, los inóculos no podrán producir las enzimas necesarias para procesar el carbono. Si es que ocurre todo lo contrario y la cantidad de nitrógeno es muy alta, esta concentración inhibirá el crecimiento de las bacterias. Para un óptimo

proceso de digestión anaerobia y producción de biogás se necesita un ratio de entre 25 y 30 C/N en los lodos residuales **(Sanitation and Energy, 2018).**

3.7. Parámetros operacionales de funcionamiento

Los parámetros operacionales hacen referencia a las condiciones de trabajo en la que deben funcionar los biodigestores para obtener una alta producción de biogás en un tiempo relativamente prudente. Los principales son:

- Temperatura: Este factor es uno de los más importantes en todo el sistema debido a que la velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta esta, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a una mayor producción de biogás. Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden gatillar la desestabilización del proceso.

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos, para el caso de los microorganismos psicrófilos, los cuales tiene una baja temperatura de crecimiento, es inferior a los 20°C o 15°C, luego los mesófilos la temperatura puede variar entre los 20°C y los 45°C, y finalmente los termófilos los cuales son microorganismos capaces de soportar temperaturas extremas superiores los 45°C, siendo la velocidad máxima específica de crecimiento (μmax) mayor, conforme aumenta el rango de temperatura.

Rango de temperatura en °C	Tipo de microorganismo	Microorganismos encontrados
10-15	Psicrófilos	*Bacillus spp*
20-30	Psicrótrofos	*Clostridium spp*
30-37	Mesófilos	*Clostridium spp* *Methanococcus spp* *Methanobacterium spp*
42-46	Termótrofos	*Methanococcus spp* *Methanobacterium spp*
50-80	Termófilos	*Clostridium spp* *Lactobacillus spp* *Thermus spp* *Thermococcus spp*

Figura 15: Rangos de temperatura de diferentes inóculos durante el proceso anaerobio. Fuente: (Corrales et al., 2015)

- Agitación: Para mantener una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible la agitación, ya sea por un sistema mecánico, hidráulico o neumático. La agitación también permitirá favorecer la eficiencia del proceso al mezclar el sustrato fresco con la población bacteriana, homogeneizar la mezcla para mantener concentraciones medias/bajas de inhibidores, evitar la formación de costra, de espuma y sedimentación en el reactor y mantener uniforme la densidad bacteriana.

- Tiempo de retención. Es el cociente entre el volumen y el caudal de tratamiento, es decir, el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos. En la Ilustración 6 se indica la tendencia general de los índices de eliminación de materia orgánica (expresada en forma de sólidos volátiles, SV) y de producción específica de gas, por unidad de volumen de reactor, en función del tiempo de retención. En ella se destaca que existe un tiempo mínimo por debajo del cual el reactor no presenta actividad, que la eliminación de materia orgánica sigue una tendencia asintótica, con una eliminación completa a tiempo infinito, y una producción de gas por unidad de volumen de reactor con un máximo para un tiempo de

retención correspondiente a una eliminación de sustrato entre el 40 y el 60%. (BESEL, 2007)

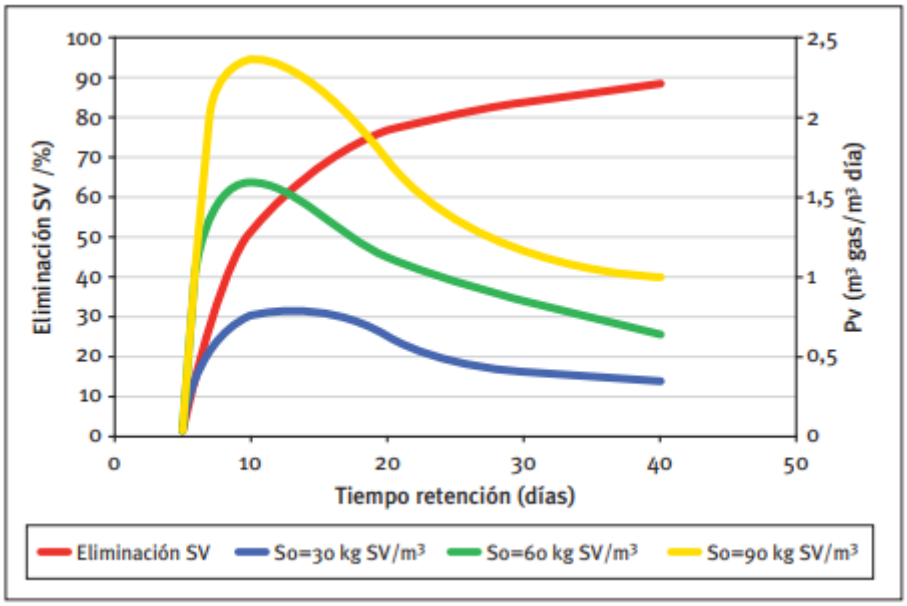


Figura 16: Eliminación de sólidos volátiles y producción volumétrica de gas para un reactor anaerobio continuo de mezcla completa en función del tiempo de retención hidráulico. Fuente: (BESEL, 2007)

- Velocidad de carga orgánica (OLR): Es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. Valores bajos implican baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención. El incremento en la OLR implica una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida (ver Ilustración 7), debiendo encontrar un valor óptimo técnico/económico para cada instalación y residuo a tratar. (BESEL, 2007)

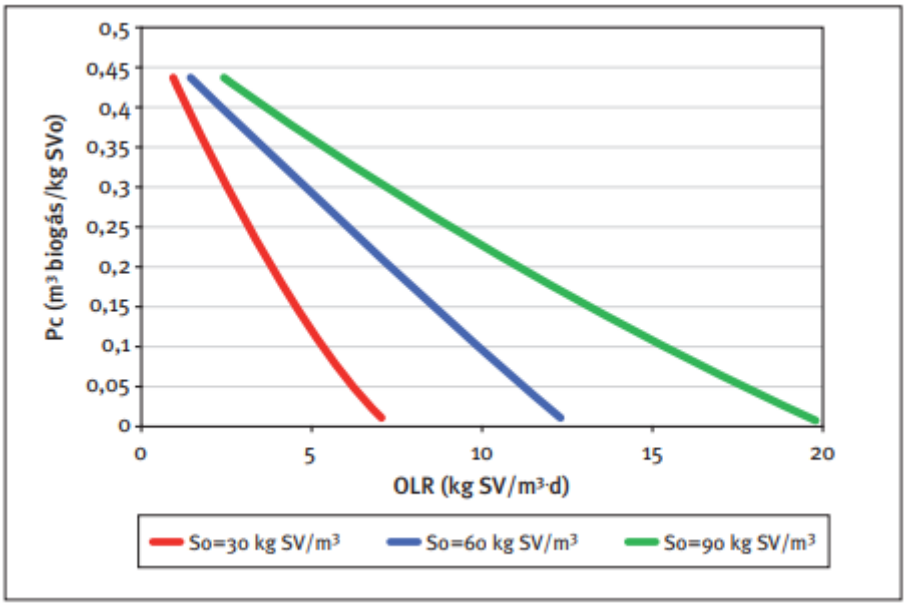


Figura 17: Producción de gas por unidad de carga en función de la velocidad de carga. Fuente: (BESEL, 2007)

3.7.1. Tratamiento del sustrato antes del Biodigestor:

Para alimentar el digestor será necesario primero realizar un análisis de los componentes de los desechos humanos, ya que como se sabe, estos tienen grandes cantidades de patógenos los cuales son portadores de enfermedades perjudiciales para la salud humana y además muchas veces pueden contener una alta cantidad de residuos fármacos los que son de difícil degradación por lo que, si se espera tener al final sustancias inertes para utilizarlas de abono, va a resultar bastante más difícil. Junto con esto se le debe hacer un tratamiento correspondiente a modo de preparación para que el cultivo de inóculos al interior del reactor sea el óptimo. Además, de realizar una reducción de tamaño de los desechos sólidos a partículas de 10 a 40 [mm], necesaria para lograr una mejor accesibilidad biológica y con mejor flujo de sustrato en el proceso.

Se debe tener cuidado con provocar cambios en los niveles de pH ya que los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica. Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad.

3.8. Codigestión:

La digestión anaerobia de un mono sustrato (mono-digestión) presenta algunos inconvenientes vinculados a las propiedades del mismo sustrato. En la Figura 18 se recogen los inconvenientes que presentan algunos residuos.

Residuo	*Inconveniente*
Lodo de depuradora	Baja carga orgánica
Estiércol de animales	Baja carga orgánica Altas concentraciones de amonio
FORSU (Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos	Concentración elevada de metales pesados
Residuos agrícolas y agroindustriales	Estacionales Carencia de amonio
Residuos de matadero y de la industria pesquera	Alta concentración de N y/o ácidos grasos de cadena larga (AGCL)

Figura 18: Tabla de inconvenientes de diferentes residuos. Fuente: (Mata-Alvarez et al., 2014)

La mayoría de estos problemas pueden ser resueltos mediante la posibilidad de tratar de manera conjunta sustratos distintos, a esta alternativa se le denomina Codigestión anaerobia.

La codigestión anaerobia consiste en la digestión de una mezcla de dos o más sustratos con características complementarias, de modo que la producción de biogás se mejora a través de su tratamiento conjunto. En comparación con la monodigestión, la codigestión anaeróbica ofrece varias ventajas, como la mejora del equilibrio de nutrientes y la relación C/N, mitigación de efectos inhibitorios debido a sustancias tóxicas a través de la dilución y la mejora cinética de la producción de metano **(Hagos et al., 2016; Mata-Álvarez et al., 2014; Shen et al., 2015; Xie et al., 2016**).

Cuando se decide plantear la codigestión como alternativa, es muy importante elegir las mejores ratios de la mezcla basadas en las interacciones positivas (por ejemplo, sinergismos y nutrientes y el balance de humedad) para evitar la inhibición (AGV, amoníaco, productos de degradación de lípidos) y para elegir el rango adecuado de otros parámetros como el pH y la alcalinidad y, por último, para optimizar la producción de metano (**Mata-Álvarez et al., 2011,**

2014; Xie et al., 2016). La codigestión ofrece diversas ventajas ecológicas, tecnológicas, y económicas, lo que da lugar a un mejor tratamiento de los residuos orgánicos. Por ejemplo, es muy importante destacar el aumento de la viabilidad económica de las plantas. En la mayoría de los casos, la producción de biogás a partir de sustratos mixtos es superior a la suma de la producción de biogás a partir de los sustratos digeridos por separado. Además, unifica la gestión de estos residuos al compartir instalaciones de tratamiento, reduciendo los costes de inversión y explotación. Asimismo, permite tratar mayores cantidades de residuos en instalaciones centralizadas a gran escala, con plantas que no requieren grandes cambios **(Alatriste-Mondragón et al., 2006; Mata- Álvarez et al., 2000)**.

Para la codigestión anaerobia, las características del sustrato y su composición son factores claves que rigen el proceso. Una revisión publicada recientemente sobre procesos de codigestión anaerobia revela que los principales sustratos utilizados son: estiércol de distinto origen (54%), fango de depuradora (22%), FORSU (Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos) (11%) y otros (13 %). Asimismo, los cosustratos más utilizados son los residuos industriales (41%), los residuos agrícolas (23%), los residuos municipales (20%) y otros (16 %) **(Mata-Alvarez et al., 2014).**

3.9. Puesta en marcha

La puesta en marcha de los sistemas anaerobios es muy importante y delicada para el proceso en el orden práctico, ya que, si no se arranca adecuadamente, el proceso puede fracasar, ser muy lento o demandar muchos recursos para mantenerse en el tiempo.
La duración de esta etapa depende de numerosos parámetros físicos, químicos y biológicos, tales como la composición y fortaleza del residuo; volumen, actividad y adaptación del inóculo; parámetros ambientales como pH, nutrientes y contenido de especies químicas en el residuo; parámetros operacionales como temperatura, carga orgánica, tiempo de retención, tamaño y geometría del reactor.

Uno de los puntos más importantes es el inóculo, ya que por medio del se introducen los microorganismos que garantizaran el arranque del proceso. En cuanto al origen del inóculo, se pueden mencionar lodos anaerobios procedentes de un reactor que esté operando con el

mismo residuo que se vaya a tratar, lodos anaerobios procedentes de distintos reactores que operen con diferentes residuos, como una mezcla de lodos, lodos anaerobios procedentes de un reactor que esté operando con sustratos complejos, lodos anaerobios procedentes de reactores anaerobios en general, residuos vacunos crudos o lodos procedentes del fondo de lagunas de oxidación, lagos o ríos. Los residuos vacunos crudos pueden ser utilizados como inóculo debido a que contienen algunas especies de bacterias metanogénicas que participan en el proceso digestivo de estos animales. En ocasiones se mezclan lodos de diferentes procedencias para potenciar la efectividad del inóculo, lo que permite contar con un número mayor de especies bacterianas adaptadas a diversos sustratos. Esta práctica es mucho más ventajosa cuando se tratan residuos de difícil biodegradación o que contienen compuestos con algún nivel de toxicidad.

Por último, las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura; mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener una buena producción de biogás. Este es un parámetro importante para el diseño, ya que servirá para conocer las cargas que podrán ser tratadas. **(Guerrero & Montalvo, 2003)**

3.10. Subproductos generados a partir del proceso de biometanización

3.11. El biogás

El biogás es un biocombustible que está formado por variadas sustancias químicas en su composición, pero contiene o debería contener predominantemente metano. El interés en esta molécula recae en que es un hidrocarburo sencillo, el cual una de las formas que reacciona es mediante la combustión, reacción exotérmica de la cual es posible obtener luz y calor útil para diversas tareas que podamos darles.

La producción del metano es un proceso ocurrido de forma natural, pero que conviene llevarlo a cabo de manera controlada puesto a que es una molécula que es eficaz para atrapar calor en comparación a otros gases presentes en la atmosfera. (Moraga, 2017)

Al tratarse de un gas combustible, resulta de importancia el análisis previo de la combustión

para que esta se realice de forma completa y no aparezcan productos indeseados en ella. La combustión completa del metano es representada por la siguiente ecuación química (1):

$$\boldsymbol{CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2\,H_2O} \quad (1)$$

Para llevar a cabo la reacción es necesario dos moléculas de oxígeno por cada una de metano. El oxígeno se encuentra presente en el aire ocupando un 21% de su composición, dato el cual sirve para calcular la cantidad de aire necesario para llevar a cabo la combustión. No obstante, para asegurar la combustión completa se le entrega aire, o en definitivo oxígeno, excediendo el valor estequiométrico. Mientras mayor es el exceso de aire, menor es la probabilidad de una combustión incompleta, pero también disminuye la temperatura de la reacción y la eficiencia térmica del proceso. Por lo tanto, se debe tratar de emplear el exceso de aire mínimo para que se queme la totalidad del combustible.

En los equipos esta relación aire-gas puede ser optimizada aumentando la presión del aire, incrementando la apertura de la válvula dosificadora de gas. (Manual del biogás, 2011)
Aunque la combustión sea una reacción exotérmica, su inicio puede requerir que se aporte calor hasta llegar a la temperatura de ignición, una característica de cada sustancia. Una vez que comienza la combustión, el propio calor que desprende la reacción sirve para que esta continúe. La cantidad de energía que se desprende cuando ocurre la combustión se denomina poder calorífico, que es una especie de “densidad energética” (Ejemplo: Joules por kg de combustible). El poder calorífico inferior (PCi) del biogás está comprendido entre 17 y 34 [MJ/m³] en función del contenido de metano (Compostaje Red Española, 2016).
Las especificaciones técnicas relativas a potencia calorífica del gas para inyección a la red de gas natural o mezclas de gases para combustión en motores utilizan el índice de Wobbe (IW) superior o inferior.

$$\boldsymbol{IW = \frac{PC}{\sqrt{\rho}}} \quad (2)$$

Donde PC es el poder calorífico y ρ la densidad relativa del gas respecto al aire. Hay que considerar que la ecuación 1 es una situación idealiza dado a que el biogás, además de metano, contiene dióxido de carbono y diversas impurezas las cuales provocan efectos indeseados y aparición de otros productos en la combustión. Ver tabla 2.

Tabla 4: Rangos de composición típicas del biogás. Fuente: (Moraga, 2017)

Componentes	Formula	Concentración
Metano	CH_4	50 - 75 % vol
Dióxido de carbono	CO_2	25 - 45 % vol
Vapor de agua	H_2O	2 -7 % vol
Oxígeno	O_2	< 2 % vol
Nitrógeno	N_2	< 2 % vol
Amoníaco	NH_3	< 1 % vol
Hidrógeno	H_2	< 1 % vol
Ácido sulfhídrico	H_2S	20 - 20.000 ppm

Las distintas concentraciones de los componentes del biogás generado dependen del funcionamiento del proceso, además de las características fisicoquímicas y composición del material utilizado como materia prima. Cuando su contenido de metano es superior al 45% es inflamable. **(Manual del biogás, 2011)**

Tabla 5: Equivalencia energética del biogás en comparación con otros combustibles. Fuente: (Manual del biogás, 2011)

Energía equivalente del biogás y otras fuentes						
Valores	Unidad	Biogás	Gas Natural	Gas propano	Gas metano	Hidrogeno
Valor calorífico	kW/h	7	10	26	10	3
Densidad	kg/m³	1.1	0.7	2.01	0.72	0.09
Densidad respecto al aire		0.81	0.54	1.51	0.55	0.07
Límite de explosión	%	6 a 12	5 a 15	2 a 10	5 a 15	4 a 80
Temperatura de encendido	°C	687	650	470	650	585
Requerimiento teórico de aire	m³/m³	6.6	9.5	23.9	9.5	2.4
*Composición promedio del biogás: CH_4 (65%) - CO_2 (35%)						

Existe una serie de sistemas que operan en base al fenómeno de la combustión, como, por ejemplo, quemadores, motores de combustión interna, turbinas a gas, hornos industriales, calderas, entre otros. Algunos de estos equipos permiten el aprovechamiento directo de la

energía térmica producida por la combustión, mientras que otros la transforman en energía mecánica o van más allá obteniendo energía eléctrica.

3.11.1. Aplicaciones del Biogas

El aprovechamiento directo de la energía térmica desprendida de la combustión es el uso más simple del biogás y puede cubrir actividades básicas como cocinar, calentar agua e incluso iluminar. Los requerimientos de calidad del biogás para quemadores son bajo y estos se pueden adaptar fácilmente desde gas natural a biogás cambiando la relación aire-gas, procurando alcanzar una presión de gas de 8 a 25 [mbar] y mantener niveles de H_2S inferiores a 100 [ppm]. **(Moraga, 2017)**

Para otros usos, como generación de energía eléctrica, se tiene diferentes requerimientos de la calidad del gas, para lo cual existen procesos de purificación y acondicionamiento del biogás. El primero es un pretratamiento que involucra la remoción de contaminantes del flujo gaseoso y el segundo se refiere a la remoción del CO_2. Una vez que el gas está “limpio” también se tiene la opción de que sea inyectado en la red de gas natural, pero para ello debe aprobar los requerimientos establecidos por la Norma Chilena NCh 2264, en donde se establece un rango o límite de concentración para los componentes del gas, como el H_2S, el H_2O, e incluso un valor para el poder calorífico superior de la mezcla.

Es importante tener en cuenta el artículo N° 22 del Decreto 119 el cual indica: “Los artefactos que se utilicen en toda planta de biogás deberán corresponder a artefactos a biogás o artefactos adaptados. En el caso de instalaciones domiciliarias, sólo se podrán utilizar artefactos a biogás”. **(Moraga, 2017)**

Tratamiento del biogás

Uno de los principales aspectos para tener en cuenta para elegir el proceso adecuado de purificación es el uso final que se le dará. La valoración más sencilla es la de utilizar el biogás directamente como energía térmica, ya que no es necesario purificarlo para poder utilizarlo con ese fin, aunque generalmente se usan filtros de lana de acero para quitar sulfuros que generan corrosión y gases indeseados en la combustión. No obstante, no siempre existirán necesidades de energía térmica cercanos a la fuente de biogás.

Al purificar el biogás se tendrá beneficios como aumentar el poder calorífico del combustible, ganando la denominación de gas “rico”, dado a su mayor porcentaje de metano. Y se tendrá una actitud más responsable con los equipos y cañerías de la instalación puesto a que los gases trazas generan daños como corrosión y bloqueos, lo cuales provocan por consecuencia un aumento en la mantenibilidad de los equipos, una disminución de la confiabilidad del sistema y aumento de los costos asociados al mantenimiento, y, por consiguiente, de la producción. Además, de generar otros productos en la combustión que tienen impacto ambiental.

3.12. Eliminación de Patogenos

Durante el de digestión anaeróbica los residuos además de producirse la producción de metano, se genera la reducción de la carga patógena contenida en los residuos tratados. La digestión anaerobia es un muy buen método para reducir y eliminar una gran cantidad de patógenos presentes en las heces humanas que son portadores de enfermedades para pa población humana. Es por eso que se debe de mantener un correcto manejo de este tipo de sustancias ya que de lo contrario podría resultar muy nocivo para la salud de las personas.

Se han realizado varios estudios con respecto al tratamiento que se les debe aplicar a los lodos residuales para poder reducir su carga viral y quizás darles un nuevo uso dentro del proceso de generación de biogás. Por ejemplo, utilizando solo el método de la digestión anaerobia se estimó en uno de los estudios que se reducen alrededor de entre 75% y 90% las DBO, mientras que las coliformes se reducen entre un 60% y un 99,9% (La Digestión Anaerobia, 2005). Pero muchas veces no basta con estos valores que pueden oscilar dependiendo del tipo de residuo y parámetros operacionales del sistema.

Otros estudios por su parte proponen métodos de pretratamiento, es decir antes de que se ingresen los desechos al reactor o durante el proceso de digestión se le adhieren diferentes compuestos químicos o se le agregan etapas para así disminuir los patógenos presentes y

evitar la propagación de enfermedades. Uno de los métodos más eficientes es el del “Biolac” o proceso de fermentación láctica. Este estudio se realizó tomando muestras de heces humanas en baños secos, misma situación que se plantea en este trabajo. Este tratamiento consistió en la inoculación de bacterias acido lácticas de una solución llamada “Biolac” y activada con melaza como fuente energética y se evaluó su desempeño en un tiempo determinado. En los resultados del estudio se obtuvo que mediante el pretratamiento diluyendo las heces con agua en la proporción peso:volumen de 5:1 (5 de excreta por 1 de agua) y por medio del tratamiento ácido es posible obtener un producto estabilizado líquido por lo menos desde el tercer día de fermentación, teniendo un pH ácido y estable por un período de 30 días, parámetro que garantiza se mantenga estabilizado el sistema **(Mindreau Ganoza et al., 2016).** Se determinó que el parámetro más interesante del pH para los fines del estudio fue entre 4.0-4.5. Estos valores fueron evidentes con el descenso abrupto del pH al segundo día de ser inoculadas las muestras. Según los análisis microbiológicos y parasitológicos el producto de la variante T9 tuvo una reducción de coliformes totales, fecales y E. coli en un 99.9%, disminuyendo su alto riesgo para la salud y pudiendo ser considerada para su vertido en suelos como enmienda agrícola y para la recuperación de áreas verdes **(Mindreau Ganoza et al., 2016)**

Análisis Microbiológico	Excreta fresca	Estabilizado T9	% de Reducción
(1) Enumeración de coliformes totales (NMP/100 mL)	> 16 x 10^8	21 x 10^4	99.9 %
(1) Enumeración de coliformes fecales (NMP/100 mL)	> 16 x 10^8	21 x 10^4	99.9 %
(1) Enumeración de *Escherichia coli* (NMP/100 mL)	> 16 x 10^8	19 x 10^4	99.9 %
(2) Recuento de *Lactobacillus sp* (UFC/mL)	28 x 10^6	51 x 10^7	

(1) SMEWW 21 st Ed. 2005, Part 9221. APHA-AWWA-WEF.
(2) International Commission Specifications for Foods. 1983. 2da Ed. Vol 1 Part II, (Trad. 1988) Reimp. 2000. Editorial Acribia.

Figura 19: Concentración de patógenos presentes luego del proceso de estabilización
Fuente: (Mindreau Ganoza et al., 2016)

Junto con esto, este año se realizaron investigaciones sobre este tema y se publico una investigación sobre la eliminación de patogenos en la digestión anaerobia, donde se mostro y cuantifico la reducción de ciertos microorganismos presentes en aguas residuales que fueron sometidas a este metodo **(Oliden. C, UTFSM 2020).** En la figura 2.9 se muestra la reducción de patógenos, en escala de reducción logarítmica, en función del TRH para rangos de temperatura mesofílico y termofílico. En condiciones mesofílicas (2.9A), la mayor reducción se observó sobre coliformes totales, E. coli y Pseudomonas sp., Con reducciones en el rango de

unidades de 2 y 3 log, mientras que la eliminación de S. aureus fue siempre menor que 1-log. Además, no hay diferencias en la eficiencia de extracción en diferentes tiempos de residencia hidráulica **(Lopez et al., 2020).** Mientras que para el rango termofílico la eficiencia de eliminación de los patógenos aumenta logrando reducciones entre 3-4log, sin embargo, la reducción de S. aureus sigue siendo menor a 1log".

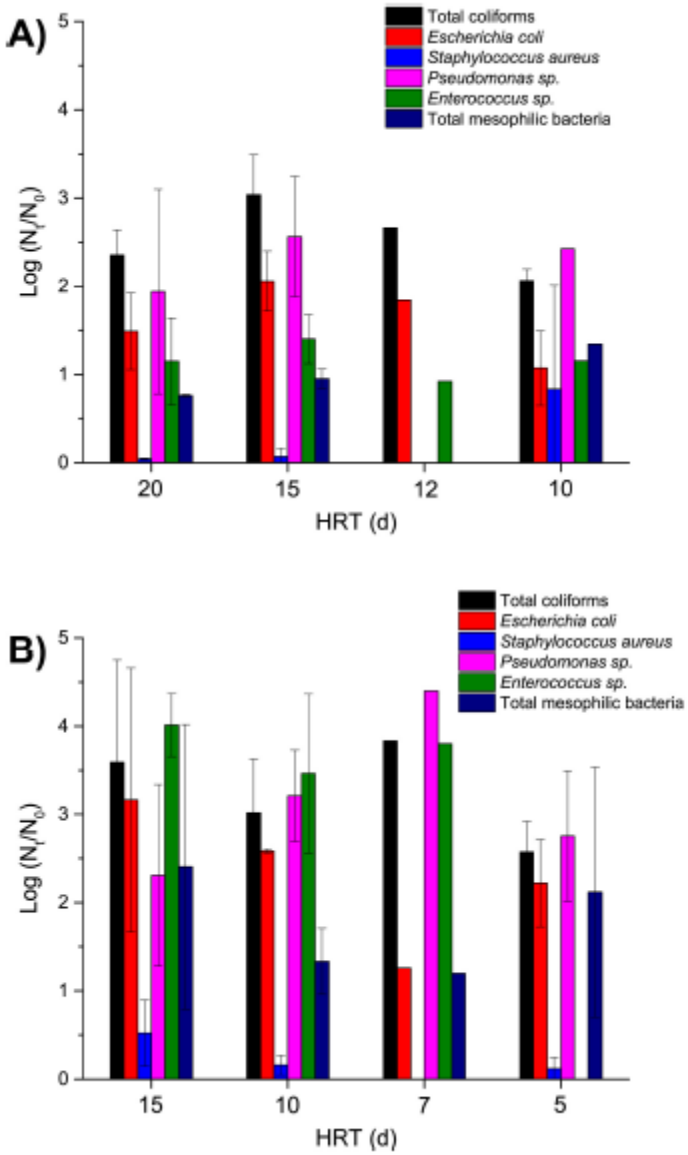


Figura 20: Reducción de bacterias después de la aplicación de diferentes TRH en la digestión anaeróbica en: a) condiciones mesofílicas; b) condiciones termofílicas. Fuente: (López y cols., 2020)

Mientras que otros estudios como (Ottosson et al., 2008) sobre la eliminación de agentes patogenos en el regimen mesofilico demostro que las tasas de inactivación de bacterias aumento en cultivos con alto contenido de amoniaco, especificamente la salmonella y enterococos (Tesis Cristian Oliden, 2020).

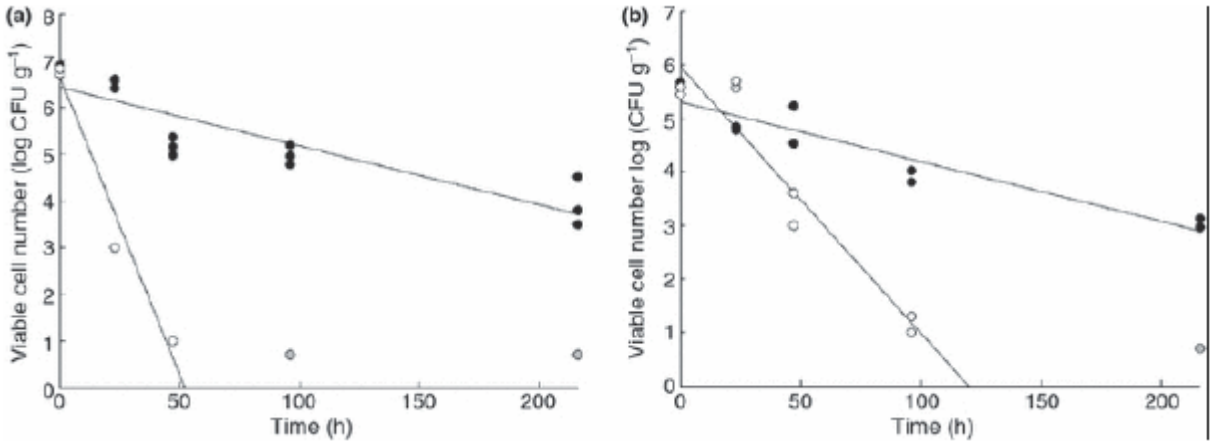


Figura 21: Números de Salmonella (a) y enterococos (b) (log UFC g 1) en función del tiempo (h) en cultivos discontinuos de control y de alto contenido de amoníaco. Fuente (Ottonson et al., 2008)

El problema que existe con la adición de amoniaco al reactor en si, es que el amoniaco es un agente ihnibidor de la producción de biogas, por lo que para poder realizar esta estabilización es necesario aplicarla una vez extraidos los lodos del reactor.

3.13. Antecedentes Internacionales

Actualmente se tiene que la generación de biogas a nivel mundial esta en aumento. Los países Europeos y Asiaticos por sobre todo han encontrado gran potencial en este recurso supuestamente considerado inutil por muchas entidades. Por ejemplo tan solo en Europa existen 18.000 plantas de biogas en donde los agentes principales son Alemania y Suecia. En suecia el 90% del gas consumido es de carácter renovable mientras que en Alemania existen 10.000 plantas de biogas en donde muchas veces ocurre que ciudades completas se abastecen con este recurso, ademas de contar con vehiculos como buses o autos que funcionan en base a este biocombustible (Diario El Confidencial, 2019).

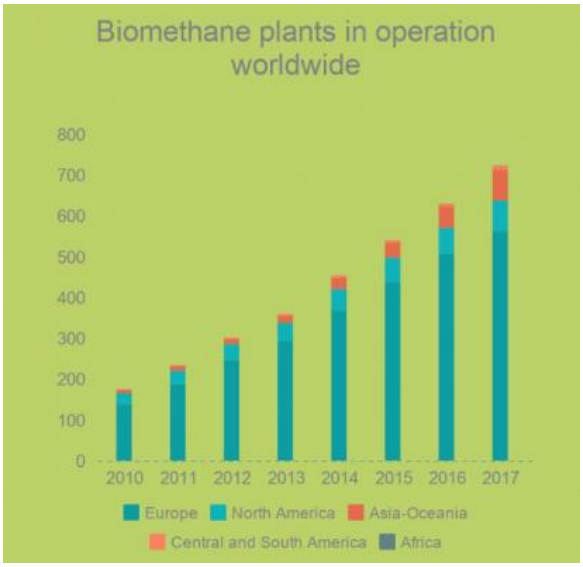


Figura 22: Plantas de biogás en operación a nivel mundial. Fuente: (Cedigaz, 2017)

Ahora en cuanto al uso de heces humanas, se esta volviendo todo un tema recurrente sobre todo en el continente Asiatico, en donde los países de China e India son los que destacan en su producción. Se estima que alrededor de 8 millones de sistemas de biogas caseros se han instalado en China hasta la actualidad, mientras que alrededor de 3.5 millones en India, generando mas de 9.000 metros cubicos de biogas al mes. Por ejemplo se estima que en un baño publico para una poblacioón de 1000 habitantes, se producen alrededor de 1000 metros cubicos de biogas diariamente, los cuales son usados como calefacción o para generar energía electrica. Junto con esto se esta trabajando en pequeños modelos para plantas de tratamiento de aguas servidas en donde se espera aumentar aun mas la producción de biogas e instalar plantas de generación electrica de grandes dimensiones en base a este recurso. En donde ademas de generar este biocombustible se reutilizan los desechos como abono para la agricultura del sector, se estima que de esta forma se producirían alrededor de 28 millones de toneladas de abono anualmente solo utilizando este sistema . **(Sanitation and Energy, 2018)**.

Como se menciono anteriormente los numeros no fallan, este tipo de energía esta cada vez mas en crecimiento y la rentabilidad crece aun mas con el desarrollo de nuevas tecnologías para este rubro. Cabe decir que no solo se esta otorgando de un buen saneamiento e higiene a una población, sino tambien de los recursos necesarios para tener una vida de calidad.

3.14. Contexto Nacional

En Chile la realidad es muy diferente. La producción de biogas no es tan relevante como en otros países y el uso de los lodos residuales para este tipo de sistemas esta muy limitado debido a la legislación actual.

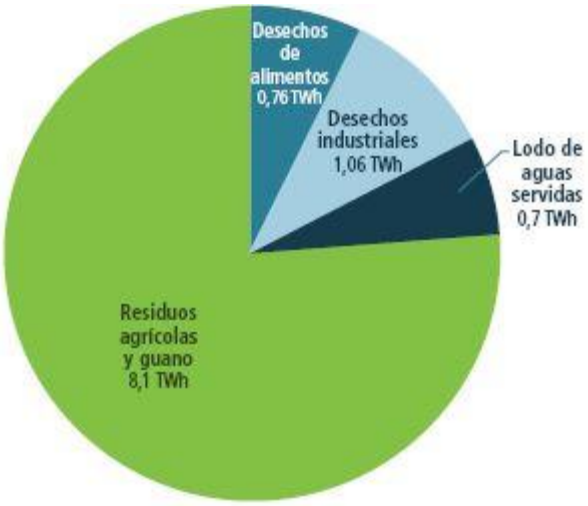


Figura 23: Producción de biogás en Chile

En Chile se están desarrollando proyectos de biogás a diferentes escalas y para distintos usos energéticos. Los proyectos de biogás que inyectan Energía Renovable No Convencional al Sistema Interconectado Central (SIC), a marzo de 2015, generaban un total de 43 MW. Destacan los proyectos: Planta Biogás HBS Los Ángeles y Tamm de residuos de planteles lecheros; KDM Loma Los Colorados y Santa Marta que aprovechan el biogás de los rellenos sanitarios; La Farfana y El Trebal que generan biogás a partir de lodos de aguas servidas **(Redagrícola, 2017)**.

Además, existen una serie de proyectos de biogás, liderados principalmente por la industria alimenticia y agropecuaria, cuyo objetivo ha sido la generación de energía eléctrica y/o térmica para reemplazar el consumo de combustibles fósiles, así como realizar un tratamiento adecuado de los residuos que generan sus propios procesos. Un ejemplo es la planta de tratamiento de riles de CCU, en Temuco, en la cual el biogás se utiliza para la generación de energía térmica para el proceso de producción de cerveza.

Uno de los proyectos que está generando más expectativa son las “biofactorías” lideradas por la compañía Aguas Andinas en Santiago. Estas plantas de tratamiento básicamente funcionan utilizando como principal sustrato las aguas residuales provenientes de los

sistemas de alcantarillado, en donde utilizan el principio de la digestión tanto aeróbica como anaeróbica para poder satisfacer las demandas energéticas de la misma planta y dejando disponibles más de 130 GWh/año para otros usos requeridos por el país y así convertirse en las primeras plantas de tratamiento sustentables a nivel nacional.

4. Metodología Experimental en Laboratorio

Debido a que esta tesis estaba dirigida originalmente a un trabajo experimental para obtener la cantidad de biogas producido mediante el uso de la digestipon anaerobia en heces humanas, utilizando muestras tipo batch en el laboratorio. Se hace necesario desarrollar una metodología experimental para los futuros estudios y continuación de este trabajo.

La metodología experimental consiste basicamente en los parametros a tener en cuenta y los pasos a seguir para desarrollar un correcto ensayo y posterior analisis de un experimento fisico en un laboratorio utilizando los equipos o instrumentos adecuados para establecer una conclusión practica o simplemente corroborar de manera empirica resultados obtenidos de forma teoríca para un proceso o reacción biologica. A continuación se expondra de la mejor forma posible como llevar a cabo el ensayo empirico para estimar la cantidad de biogas que se produce en un volumen determinado de residuos utilizando el metodo de la digestión anaerobica.

4.1. Objetivo

Se plantea como objetivo principal estimar la cantidad de metano que se puede producir en un tiempo aproximado de 30 días en los diferentes batch, sometidos a diferentes cantidades de residuos. Debido a que las heces humanas no poseen un gran ratio C/N se se ha estimado en estudios que la capacidad que tiene de producir biogas en bajas cantidades es minima en comparación con otras sustancias. Es por eso que se plantea el uso del metodo de codigestión, en donde se planea mezclar las heces con otros residuos caseros tipicos de hogares como lo son restos de comida, vegetales, legumbres, carnes, etc, en conjunto con otros materiales organicos como celulosa o heces animales. Esto con el fin de aumentar la producción de CH4 y ademas neutralizar de mejor forma los patogenos presentes en las heces humnas, para proporcionar mayor viabilidad al proceso en general.

Figura 24: Ensayos tipo Batch en laboratorio.

4.2. Condiciones Iniciales

4.2.1. Substrato

El substrato que alimentara las muestras debe estar definido lo mas minuciosamente posible, en particular entregando el dato del total de solidos (TS) y solidos volatiles (VS) presentes. Ademas de la demanda de oxigeno quimico (COD), nitrogeno y fosforo. Asi de esta forma es posible calcular el ratio COD/VS el cual es caracteristico de cada substrato.

Otros datos importantes a definir son el contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa, los cuales son datos importantes en todos los residuos de carácter agricola. Esto debido a que la precencia de lignina no contribuye a la producción de biogas.

Para el caso de residuos acidos tipicos en la alimentación humana, se deben tener en importante consideración durante el proceso de digestión ya que estos suelen disminuir la cantidad de solidos volatiles lo que perjudica al porcentaje total de solidos presentes en la muestra, aumentando el pH lo que a su vez se refleja en un mal funcionamiento de los inoculos en el proceso.

Ahora para el tamaño de las particulas del substrato, este puede alterar de forma considerable el ratio de biogas que se produce durante la reacción mas que la cantidad final producida. Aunque existen estudios que plantean que el tamaño si influye en la cantidad final

que se podria obtener luego de un ensayo.

4.2.2. Inoculo

El inoculo o las bacterias que actuan en el proceso de digestión anaerobia deben ser extraidas “frescas” de cualquier tipo de reactor anaerobico a disposición en el orden de asegurar que los diferentes substratos no se encuentren con limitaciones durante las etapas del proceso quimico. Este debe ser homogeneo y materiales presentes de biomasa de gran tamaño deben ser removidos. Se pueden usar inoculos mesofilicos o termofilicos dependiendo de las condiciones de temperatura en que se encuentren las muestras a evaluar.

Este ademas debe estar desgasificado y pre incubado en los batchs para poder alimentar las muestras de material organico biodegradable. La pre incubación debe realizarse a la misma temperatura a la cual tendra lugar la reacción. Este proceso de incubación debe durar entre 2 a 5 días. No se le debe aplicar ningun tratamiento externo al inoculo antes de ingresarlo a las muestras.

4.2.3. Parametros durante el proceso.

4.2.3.1. Actividad del Inoculo

La calidad de la actividad del inoculo debe ser revisada constantemente mediante tests de desempeño de actividad en el nivel de acetato y celulosa. El inoculo debe tener un minimo de actividad especifica sobre el acetato de 0.1 g CH4-COD/g VSS*d por residuo y 0.31 g CH4-COD/g VSS*d por desecho granular.

Para el caso de los inoculos en la fase metanogena, H2/CO2 o 1 g/l de acido acetico se sugiere para los organismos productores de hidrogeno en conjunto con los organismos productores de mateno y CO2. Para el caso de la acetogenesis, se recomienda una cantidad de 0.5 g/l de acido propílico y butírico. Para la determinación de la actividad acidogenica, se puede usar 1 g/l de glucosa como substrato. Mientras que para la actividad hidrolitica 1 g/l de celulosa por organismo celulolítico. El comportamiento cinetico de los inoculos se representa por un modelo de orden cero cuando la concentración del inoculo es mayor que la cantidad

de biomasa presente en la muestra, por lo tanto la concentración de este debe ser siempre mayor que la comparada con el substrato en comparación con los solidos volatiles, por lo que el ratio substrato inoculo (S/I), debe ser reconocido como uno de los parametros mas importantes que influyen en los resultados de los ensayos.

El volumen relativo del inoculo a utilizar en los ensayos puede variar de diferentes formas, dependiendo de la actividad de este y la concentración de biomasa que tenga, en conjunto con el porcentaje de biomasa y biodegradabilidad presente en el substrato. Para el caso de las heces humanas al tener una alta concentración de solidos volatiles, es necesario un volumen considerable para evitar la formación de condiciones acidas. Este volumen se puede estimar haciendo un simple balance de masa dada la tasa de hidrolisis y la actividad de biomasa presente. Por ejemplo acorde a Angelidaki & Sanders (2004) el volumen se determina mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{Vinoculo} = \frac{\mathbf{Xss} * \mathbf{Vww} * \mathbf{Kh}}{\boldsymbol{VSSinoculo} * \boldsymbol{SMAinoculo}} \qquad \textit{(1)}$$

En donde Xss (g/L) es la concentración del substrato hidrosoluble, Vww es el volumen del residuo en la muestra (L), Kh es la constante de hidrolisis de primer orden ($\boldsymbol{día^{-1}}$), Vssinoculo es el contenido de VSS en el inoculo (gVSS/L) y el SMAinoculo es la actividad especifica metanogenica del inoculo (g COD-CH4/ g VSS*día).

4.2.3.2. Medio nutritivo.

Se necesitan diferentes tipos de nutrientes y vitaminas para la optima función de los organismos anaerobicos. Esto se debe a que no todos los substratos poseen la misma cantidad de micronutrientes y muchas veces ocurre que estos carecen de los necesarios para mentener activa la población de inoculos. Por lo que si no se consiguen detectar que estos estan presentes en el substrato estos deben ser adheridos de manera externa. En la siguiente figura se muestra un proceso basico de adición de este medio.

The basic medium is prepared from the following stock solutions (chemicals given below are concentrations in g/l in distilled water).

NH_4Cl, 100; NaCl, 10; $MgCl_2$ $6H_2O$, 10; $CaCl_2$ $2H_2O$, 5

K_2HPO_4 $3H_2O$, 200

resazurin 0.5

trace-metal and selenite solution: $FeCl_2$ $4H_2O$, 2; H_3BO_3, 0.05; $ZnCl_2$, 0.05; $CuCl_2$ $2H_2O$, 0.038; $MnCl_2$ $4H_2O$, 0.05; $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$ $4H_2O$, 0.05; $AlCl_3$, 0.05; $CoCl_2$ $6H_2O$, 0.05; $NiCl_2$ $6H_2O$, 0.092; ethylenediaminetetraacetate, 0.5; concentrated HCl, 1 ml; Na_2SeO_3 $5H_2O$, 0.1

vitamin mixture (componets are given in mg/l): Biotin, 2; folic acid, 2; pyridoxine acid, 10; ridoflavin, 5; thiamine hydrochloride, 5; cyanocobalamine, 0.1; nicotinic acid, 5; P-aminobenzoic acid, 5; lipoic acid, 5; DL-pantothenic acid.

To 975 ml of distilled water, the following stock solutions should be added (A), 10 ml; (B), 2 ml; (C), 1 ml; (D), 1 ml and (E), 1 ml. The mixture is gassed with 80% N_2 - 20% CO_2 mixture to maintain a neutral pH. Cysteine hydrochloride, 0.5 g and $NaHCO_3$, 2.6 g dissolved in 10 ml distilled water are added and the medium is dispensed to serum vials and autoclaved if necessary. Before inoculation the vials are reduced with Na_2S $9H_2O$ to a final concentration of 0.025%.

It is important that stock solutions are added to water, and not the contrary, to prevent precipitations phenomena.

Figura 25: Método de adición de nutrientes necesarios para el ensayo. Fuente: (Angelidaki et al., 2009).

4.3. Cantidad de Muestras

La cantidad de batchs a evaluar debe ser al menos 3 por cada compisición, dependiendo de la complejidad del substrato y la reproductibildiad de las muestras. Esto permite un buen analisis estadistico de la información recolectada y permite la posterior viabilidad de otros ensayos.

4.4. Agitación

La agitación facilita el contacto entre las bacterias y el substrato, previniendo la acumulación de este ultimo y una condición de homogeneidad general en el envase de la muestra. La agitación puede ir variando según el potencial de producción de metano de cada batch, es por eso que se debe revisar cada día el estado de la muestra y agitar al menos una vez al día el envase de forma intermitente en grandes envases y continua en pequeños envases. Esta acción puede ser vital a la hora de recolectar información acerca de la producción de metano y el estudio de la actividad cinetica.

4.5. Set up Experimental.

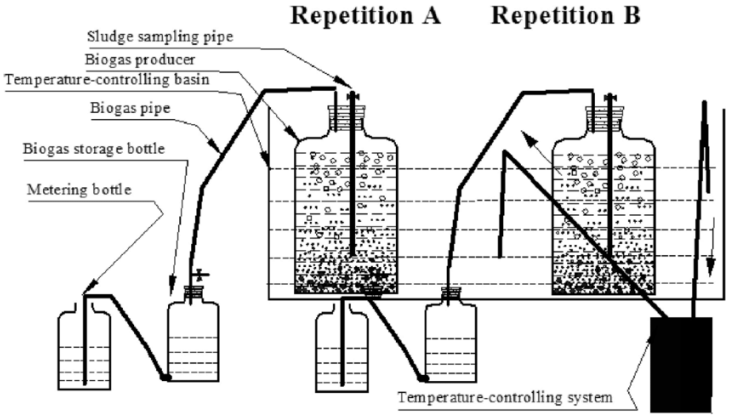


Figura 26: Set up de recipientes batch durante el ensayo.

Los ensayos o muestras deben ser replicados al menos 3 veces bajo las mismas condiciones de substratos como se menciono anteriormente, y si el substaro es muy heterogeneo, las muestran deben replicarse mas de 3 veces para obtener resultados confiables. Los ensayos deben ser realizados en envases o batchs cerrados de entre 100ml a 2 litros de volumen, dependiendo de la homogenindad del substrato. Para sustratos nuevos con caracteristicas desconocidas de degradación, es necesario un numero diferente de disoluciones en agua con el fin de establecer un potencial de producción de metano adecuado para el substrato y evitar cualquier riesgo de inhibición en la generación de biogas. Cuando la producción de metano es la misma en al menos dos ensayos se puede concluir que el inoculo no es inhibido.

Los envases deben ser limpiados continuamente con N2/CO2 (80%/20% de volumen) antes de ser utilizados en los ensayos. Ademas de ser continuamente agitados manteniendo siempre la condición anaerobica durante todo el proceso de transferencia. El medio nutritivo puede ser adherido directamente o diluido en agua. La transferencia del inoculo es usualmente llevada a cabo con una jeringa de 100ml conectando el orificio de esta con el fonde del envase. Para el caso del inoculo de tipo granular, este debe ser adicionado usando un colador de laboratorio que se adapte al tamaño del envase para eliminar los granulos. Una vez transferido el inoculo y el medio al envase este se debe cerrar con un tapo de goma el cual es sellado con una riza de aluminio.

4.6. Recolección de la Información

Los resultados de las pruebas batchs para determinar el potencial de producción de metano de las diferentes muestras pueden ser medidos de diferentes metodos entre los que destacan, los metodos volumetricos, manometricos, cromatografia de gases con ionización de flama o conductividad termica, etc. En estos casos el metano acumulado en el espacio superior entre el tapon y el material de desecho es medido mediante una cromatografía de gas. Para esto una muestra de volumen del gas se extrae mediante una jeringa especial, y posteriormente inyectado al equipo de medición correspondiente. El area peak obtenida debe luego ser comparada con la resultante al inyectar el mismo volumen de un gas estándar cuya composición es conocida. Este gas estándar debe ser inyectado con una jeringa a presion normal. El volumen de metano producido se obtiene multiplicando el volumen el espacio anteriormente mencionado en donde se encuentra acumulado el gas por el porcentaje de CH4 en dicha area obtenido en la medición de cromatografia.

En el reporte final es necesario que se incluyan todas las condiciones de trabajo anteriormente mencionadas, presión, tipo de substrato, tipo de inoculos, temperatura, pH, actividad biologica registrada, cantidad de ensayos realizados, etc.

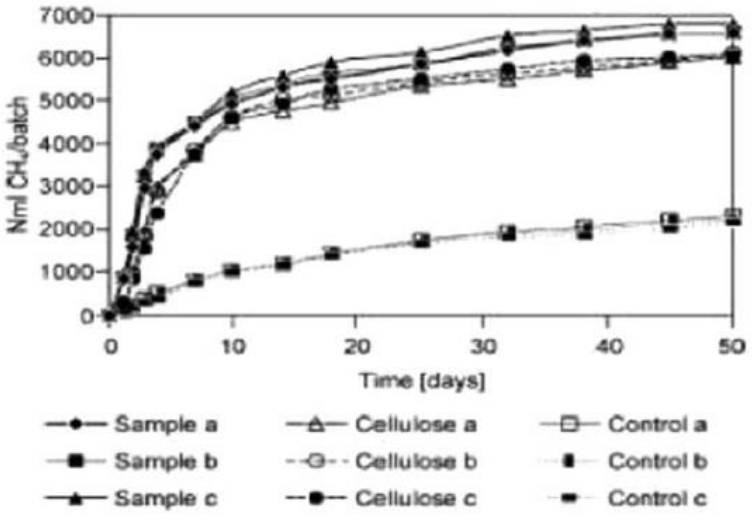


Figura 27: Grafico de potencial de biogas de un ensayo tipo batch. Fuente: (Angelidaki et al., 2009).

Una vez obtenidos todos los resultados es posible generar graficos y tablas con la producción diaria o semanal de biogas mediante la siguiente expresión.

$$\frac{lnB_{\infty}-B}{B_{\infty}} = -k_h t \qquad (2)$$

En donde B_{∞} es el valor de la producción total final de metano y B es la producción de metano obtenida a cierto tiempo, t. Y la $k_h t$ es la constante de hidrolisis, que se puede determinar como la pendiente de la curva obtenida.

5. Metodología de Diseño

Para plantear un correcto diseño de un sistema de generación de biogas utilizando heces humanas, se debe de aplicar una determinada metodologia de diseño para así no cometer errores debido a que se esta tratando con sustancias perjuduciales para la salud humana y así incrementar la viabilidad del proyecto debido a que deben de tener un correcto tratamiento y mantención.

Debido a que este trabajo es una continuación de la tesis del primer prototipo diseñado por Cristian Oliden. Basicamente se trabajara a partir de su prototipo de reactor a piston, el cual sera definido mas adelante, y en este trabajo se terminara con el diseño del sistema de generación para producir la mayor cantidad de biogas posible y poder extraerlo para los diferentes usos del hogar, ademas de gestionar de mejor forma los desechos restantes luego del proceso de digestión anaerobia.

Para la metodología del diseño se decidio por aplicar el “Modelo Metodológico I+P+D3” modificado, el cual consiste en un tipo de metodo del diseño el cual se genero mediante una investigación en donde se abarcaron diferentes tipos de metodos de diseño de diferentes autores. El desarrollo del modelo metodológico I+P+D3 se define gracias al análisis de modelos propuestos por Ronda Leon (2013), Howard et al.(2008), Design Council (2007), la Norma Alemana VDI 2221 (1986), Segonds et al. (2014), Pahl et al. (2007), Ullman & Jones (2003), Skourup & Pretlove (2007), Inti (2009) y Prointec (2004), además de la información brindada por el Manual de Frascati (2002), el Manual de Oslo (1997) y el Ciclo PHVA Walton y Deming (2004). Dentro de la información obtenida se relacionan las siguientes etapas:

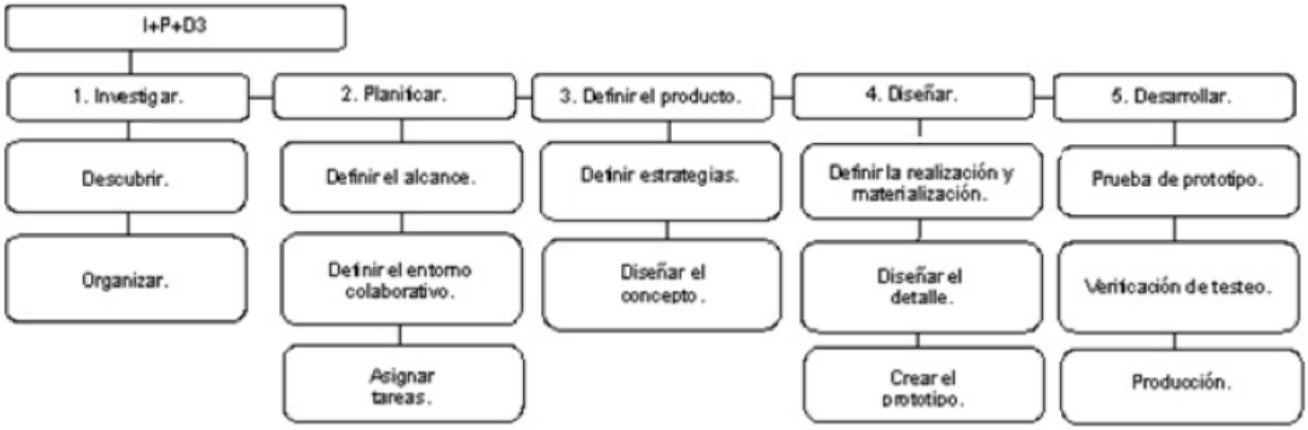


Figura 28: Ilustración del modelo Metodológico I+P+D3

5.1. Etapa 1: Investigación

Esta etapa contiene los procesos de investigación para llegar a la información precisa de los requerimientos del proyecto. Durante esta fase se realizan las indagaciones acerca de los sistemas secundarios que complementan el funcionamiento del proceso de generación de biogás para así poder estudiar qué factores y parámetros son los que influyen en el potencial de producción de metano y junto con esto poder plantear soluciones para perfeccionar el diseño en general. Además, se puede hacer investigación de mercados, así como entrevistas y cuestionarios, con el fin de obtener la mayor cantidad de datos. Para este caso se averiguará acerca de todos los sistemas secundarios que ayudan al buen funcionamiento de un sistema de generación de biogás y todas las implicancias técnicas que conllevan.

5.2. Etapa 2: Planificación

Se identifica la solución de problemas de acuerdo con la información descubierta y organizada, y se la divide en módulos o sectores para realizar el producto. En este caso se dividen los factores en subsistemas que van a colaborar con el mejor desempeño del sistema de generación.

1. Asignación de Subsistemas

5.3. Etapa 3: Definición del proyecto

En esta etapa se muestran los aspectos físicos y funcionales del proyecto. Se define la funcionalidad de cada uno del sistema y prototipo anteriormente diseñado y se definen los

subsistemas que se llevaran a cabo para implementar en conjunto con el reactor de biogás para así de esta forma mejorar el proceso de producción y facilitar la acción de los agentes biológicos presentes en las etapas de degradación.

1. Definir Funcionabilidad
2. Definir entorno donde opera
3. Especificaciones

5.4. Etapa 4: Diseño

En esta etapa se realizan los diseños preliminares y los diseños finales y se plasman los bocetos finales de forma gráfica y fácil de comprender; en ella se representan los resultados de la etapa anterior incluyendo: Estructura, funcionamiento, requerimientos técnicos y creación del prototipo.

1. Prototipo Inicial.
2. Diseño general y del detalle.
3. Aspectos Económicos.

5.5. Etapa 5: Desarrollar

Finalmente, la etapa de desarrollo se encarga en este caso de hacer las diferentes pruebas y evaluaciones del funcionamiento del sistema para ver si es necesario realizar mejoras o cambios en el proyecto para reducir costos. En este caso debido a la pandemia del coronavirus solo se pudieron hacer simulaciones teóricas por lo que una vez posible es vital realizar las pruebas prácticas para corroborar las anteriores y determinar la viabilidad del proyecto.

1. Simulaciones.
2. Resultados y discusión.

6. Desarrollo

6.1. Etapa 1: Investigación

Existen cuatro factores que influyen drasticamente en el proceso de digestión anaerobia y producción de biogas de heces humanas, estos son la temperatura, la agitación y la reutilización o reciclaje de residuos y la orina. Pero lo mas importante de estos factores es que pueden ser controlados de manera externa al proceso y así incrementar la eficiencia del reactor y por ende su potencial de producción de metano. Además se hacer mas seguro el tratamiento de desechos altamente nocivos para la salud humana. A continuación se mostrara porque es necesario mantener un control y monitoreo de estos parametros.

6.1.1. Temperatura

En la digestión anaerobia se tienen dos tipos de condiciones de temperatura de trabajo como se menciono en el marco teórico los cuales son el rango mesofilico (35°C) y termofilico (50°C) que va a depender de los microorganismos que se tengan en operación. El proceso de metanogenesis en si es considerada una reacción exotermica por lo que muchas veces no necesita de fuentes de calor externas para llevar a cabo las etapas de generación. No obstante para reactores de un tamaño considerable como este caso se hace vital contar con un sistema de calefacción externo debido a que las condiciones del entorno o de alimentación no siempre son las optimas por lo que para mantener una producción constante y eficiente de metano es necesario mantener una temperatura constante en el reactor.

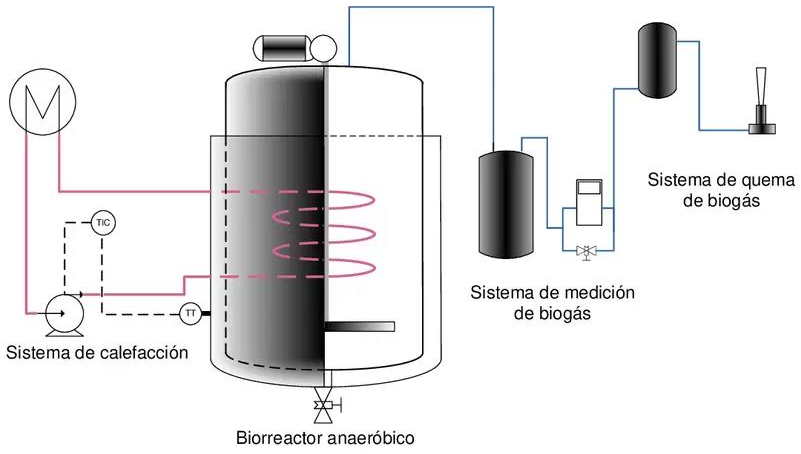


Figura 29: Esquema de un sistema de calefacción para un biodigestor industrial.

Para esto existen diversos sistemas de calefacción que pueden cumplir esta función, pero debido a que se va a trabajar con heces humanas y en condiciones de vulnerabilidad economica y social, se hace necesario idear un sistema que sea mas bien sencillo en su funcionalidad, facil de usar y mantener y que no implique el contacto con sustancias nocivas para la salud de los ocupantes del hogar.

A continuación se presenta un estudio realizado por el Instituto Harbin de Tecnología sobre los efectos de la temperatura en el proceso de digestión anaerobia de estiercol bovino, en donde se detecta una clara influencia tanto en la producción de biogas como en la actividad biologica de los microorganismos.

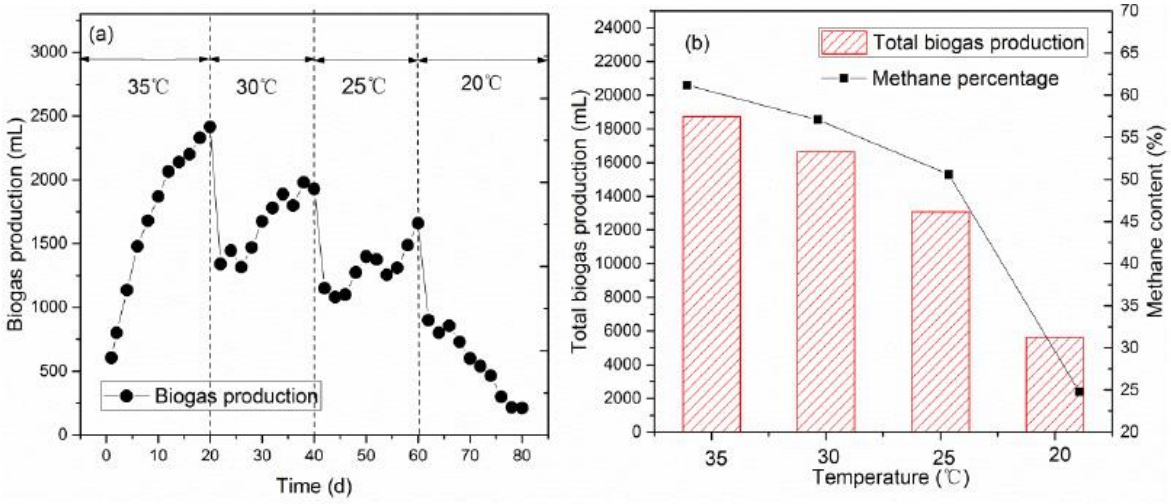


Figura 30: Gráficos de producción de biogás bajo diferentes temperaturas Fuente: (Wang et al., 2019)

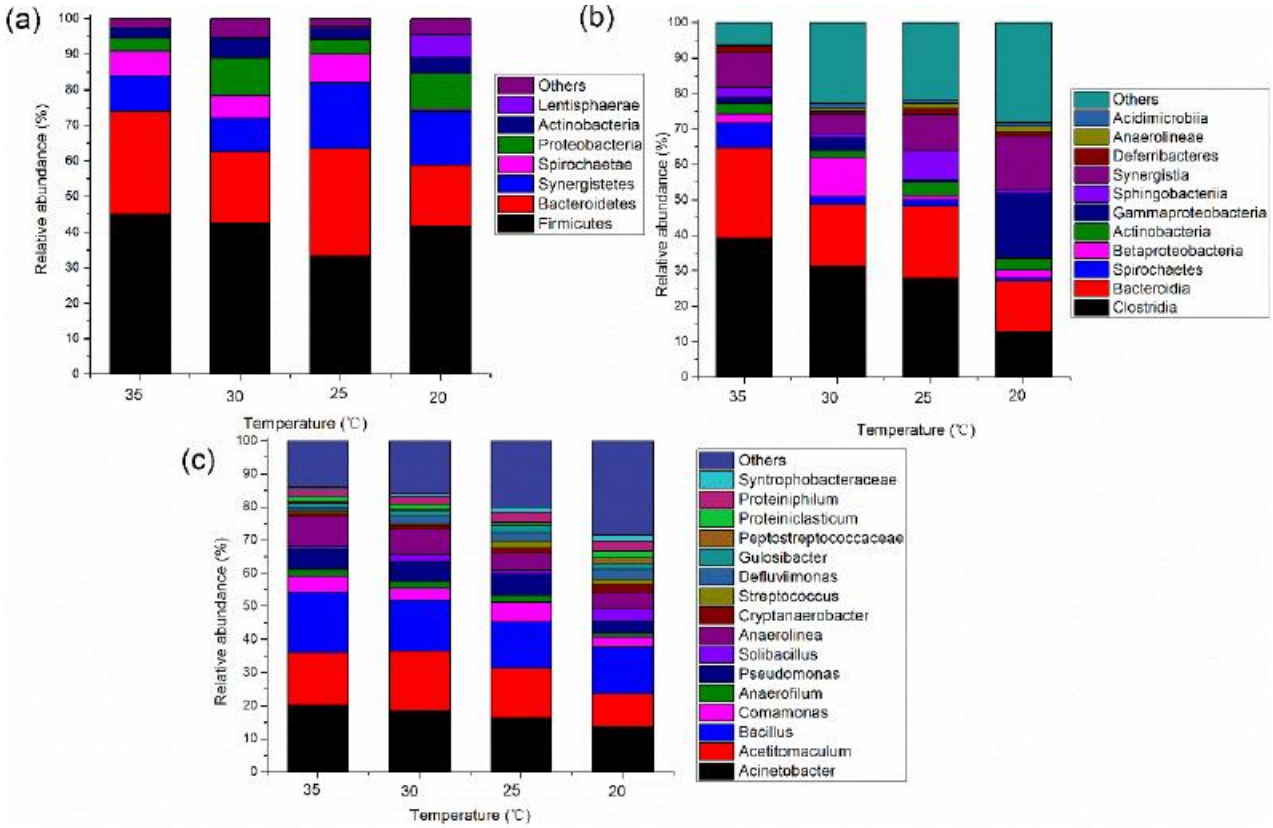


Figura 31: Estructura de la comunidad microbiana en la fase acidogénica a diferentes temperaturas: a) nivel de filo; b) nivel de clase; c) nivel de género. Fuente: (Wang et al., 2019).

Como se puede apreciar en el primer grafico a medida que la temperatura aumenta al rango mesofilico, la producción total de biogas diaria y total se ve afectada drasticamente por el incremento de temperatura. Esto se debe a que en en grafico inferior la actividad de los inoculos es mayor y mas eficiente a esas temperaturas debido a que a estas temperaturas alcanzan un mayor rendimiento biologico. Es por eso que la producción de biogas alcanza su mayor valor en el rango de temperaturas de 25°C a 35°C **(Wang et al., 2019)**.

6.1.2. Agitación

La agitación es un proceso de movimiento mediante un agitador mecanico o helice con el fin de homogeneizar y mezclar un fluido u otro tipo de sustancias biologicas en solo un medio acuoso, para así permitir la viabilidad de diferentes procesos quimicos. La agitación mecanica es utilizada en muchas tipos de reactores a nivel mundial ya que debido a los diferentes tipos de substratos con diversas composiciones y porcentaje de solidos y liquidos, muchas veces para gestionar de manera correcta los procesos biologicos es necesario un adecuado proceso de agitación para formar una mezcla homogena del susbtrato y así facilitar el proceso anaerobio, sobre todo cuando se esta trabajando con un porcentaje alto de solidos. Pero a pesar de esto, la precencia de un equipo de agitación va a depender mucho de las condiciones de operación del reactor y las caracteristicas del substrato e inoculo, ya que existen casos en que una agitación en exceso puede provocar una disminución en la producción de metano, inhibiendo ciertos procesos quimicos presentes en las etapas del regimen anaerobio.

Por ejemplo según un estudio publicado en la revista AIP Conference Proceedings, del Instituto Americano de Fisica, en el año 2017 donde muestra un sistema de generación de biogas mediante digestion anaerobia utilizando aceite de palma, se demostro que la implementación de un sistema de agitación logro aumentar tanto la producción de biogas como la actividad de los mircroorganismos. Además lograron demostrar que el porcentaje de solidos volatiles y la demanda de oxigeno quimico disminuye al utilizar un metodo de agitación discontinuo. Logrando un valor optimo de velocidad de agitación entre 100 y 200 [rpm]. Otra consecuencia de la agitación mecanica es en la composición del biogas producido **(Trisakti et al., 2017**).

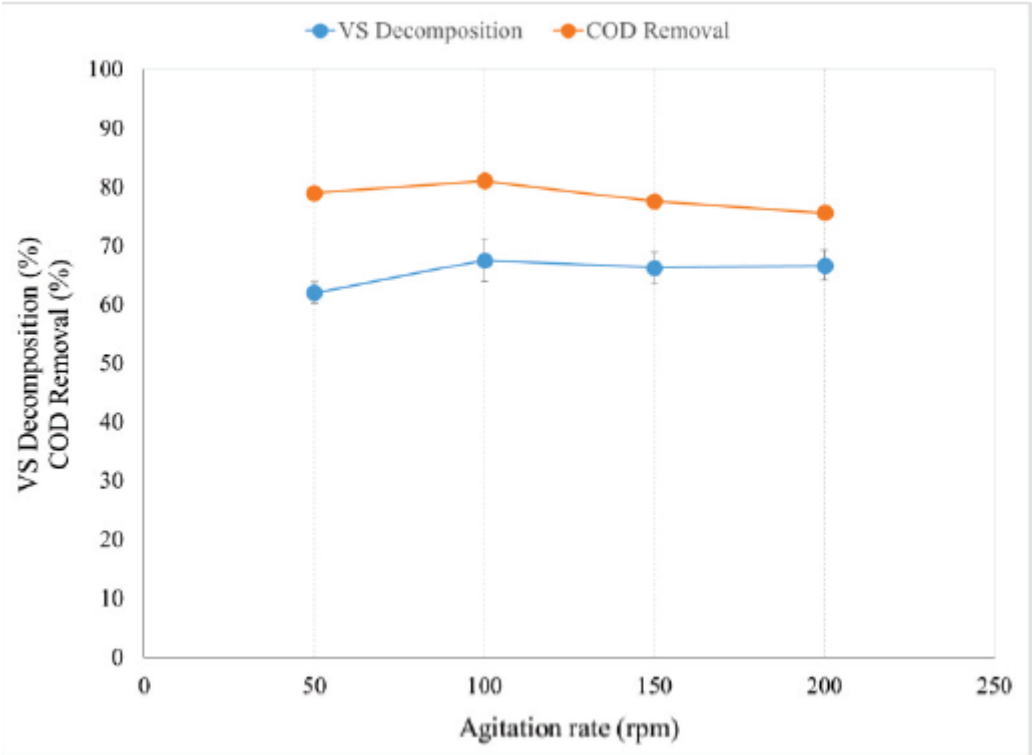


Figura 32: Grafico de descomposición de solidos volátiles y remoción del COD vs Intensidad de Agitación. Fuente: (Trisakti et al., 2017)

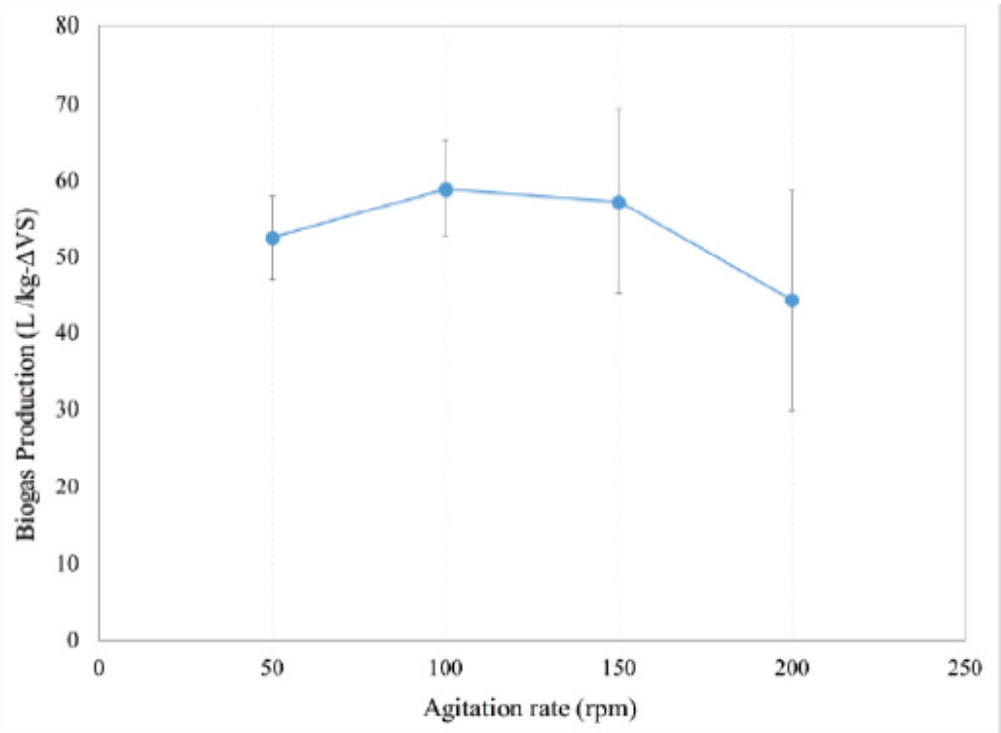


Figura 33: Grafico producción de biogás vs Intensidad de agitación Fuente: (Trisakti et al., 2017)

Pero muchas veces una agitación continua o dependiendo de las condiciones y parametros de operación es adversa para el proceso de generación de biogas. Esto se vio reflejado en un estudio acerca de los efectos de la agitación continua sobre la actividad biologica de los microorganismos presentes en un reactor anaerobio utilizando residuos municipales. En este paper se compararon dos tipos de reactores, uno con y el otro sin un equipo de agitación, llegando a los siguientes resultados.

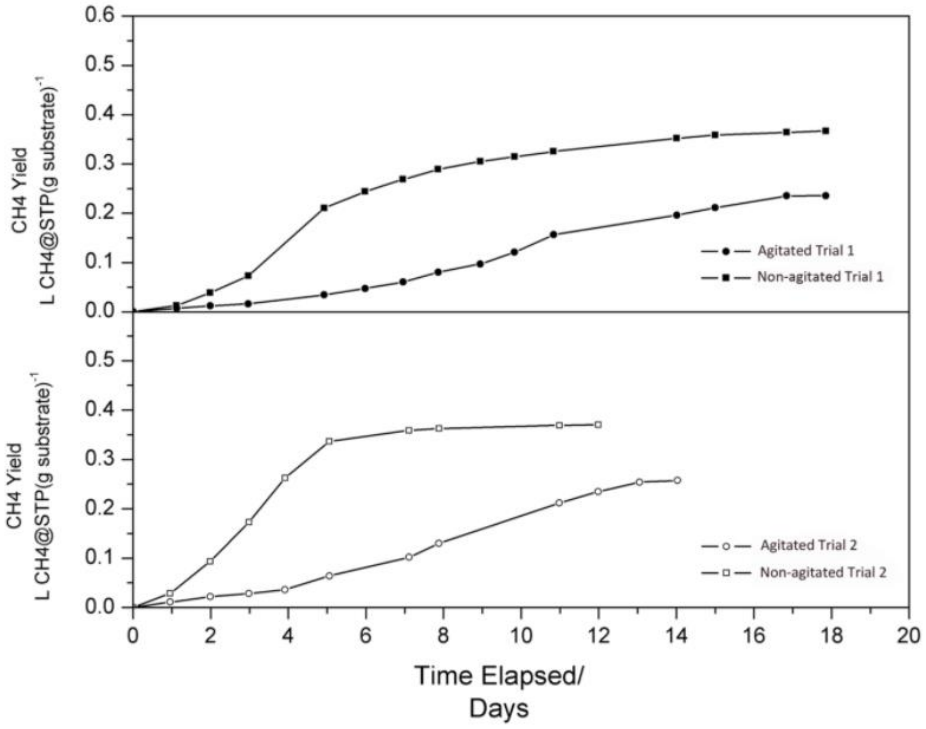


Figura 34: Comparación de la producción de metano entre dos digestores con y sin agitación. Fuente: (Tian et al., 2014)

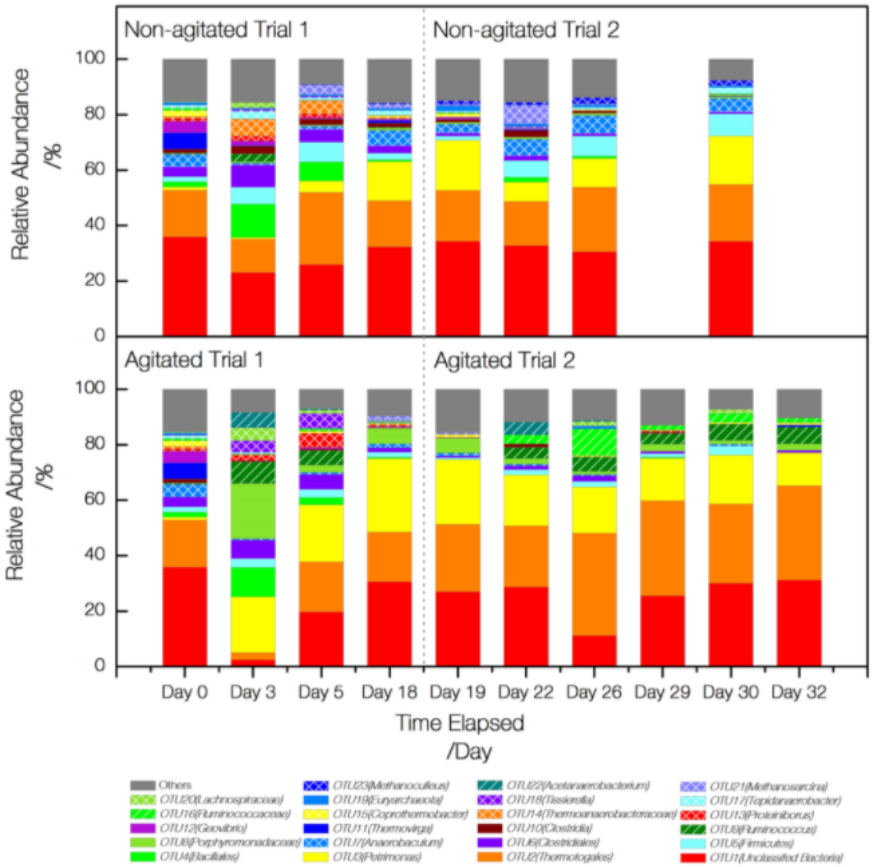


Figura 35: Abundancia dinámica de los diferentes inóculos durante el proceso anaerobio en dos digestores con y sin agitación. Fuente: (Tian et al., 2014)

Estos graficos determinan que la agitacion continua puede ser muchas veces adversa, ya que según la investigación, se produce una inhibición en el proceso de la degradación del acido propanoico y la oxidación sintropica de ciertos acidos volatiles, posiblemente debido a que la agitación interrumpe la yuxtaposición de ciertas bacterias metanogenas aunque no obstante si se genera una aumento en la producción de hidrogeno debido a una mayor actividad de estos inoculos. Por lo que a partir de esto se logra determinar que la agitación continua no es recomendable, sino que optar mas por una agitacipon discontinua

6.1.3. Reutilización de Residuos

Como se describio en el estado de arte de esta tesis, las heces humanas tienen un gran contenido de patogenos y metales pesados que son altamente dañinos para la salud humana. La digestión anaerobica cumple en cierto grado con el rol de estabilización de estos patogenos pero a pesar de todo, aun existe una concentración peligrosa luego de llevarse a cabo el proceso de biodegradación.

El objetivo que se tiene en esta parte es estudiar si es posible reutilizar los restos que se obtienen luego de la reacción anaerobica que ocurre en el reactor Debido a que actualmente este sigue siendo un tema controversial a nivel mundial, ya que aun se estan realizando estudios para confirmar si es posible reutilizar las heces humanas como abono o fertilizante para la industria agricola o simplemente uso en el hogar.

Para lograr lo anterior es necesario transformar los desechos en biosolidos de tipo A. Este tipo de biosolidos son los que cumplen las normas internacionales las cuales se enfocan en plantear rangos y valores limite para las concentraciones de patogenos y bacterias presentes en los residuos que se pretenden utilizar como fertilizantes para alimentos de consumo humano. A continuación se muestran los valores optimos de las concentraciones de microorganismos y metales pesados que debe tener un residuo para ser clasificaso como biosolido de tipo A.

Microorganisms (dry biosolids)	Unwashed	Biosolids washed	USEPA (1994) maximum acceptable limits	
			Class "A"	Class "B"
Fungi (CFU[a] g^{-1})	50 (10)[b]	30 (3)	NM[c]	NM
Total coliforms (CFU g^{-1})	1200 (170)	1000 (50)	NM	NM
Faecal coliforms (CFU g^{-1})	700 (200)	470 (180)	<1000	$<2000 \times 10^3$
Shigella sp. (CFU g^{-1})	2 (1)	ND[d]	NM	NM
Salmonella sp. (CFU g^{-1})	3 (1)	ND	<3	>300
Eggs of helminthes (eggs kg^{-1})	30×10^3 (1×10^3)	10×10^3 (1×10^3)	10×10^3	$<35 \times 10^3$

[a] CFU: colony forming units.
[b] Mean of four replicates and values between parenthesis are standard errors of the estimates.
[c] NM: not mentioned.
[d] ND: not detectable.

Figura 36: Tabla de concentraciones máxima para biosólidos clase A y B. Fuente: (USEPA, 1994).

Pollutant Limits

Pollutant	Ceiling Concentration Limits for All Biosolids Applied to Land (milligrams per kilogram)[a]	Pollutant Concentration Limits for EQ and PC Biosolids (milligrams per kilogram)[a]	Cumulative Pollutant Loading Rate Limits for CPLR Biosolids (kilograms per hectare)	Annual Pollutant Loading Rate Limits for APLR Biosolids (kilograms per hectare per 365-day period)
Arsenic	75	41	41	2.0
Cadmium	85	39	39	1.9
Chromium	3,000	1,200	3,000	150
Copper	4,300	1,500	1,500	75
Lead	840	300	300	15
Mercury	57	17	17	0.85
Molybdenum[b]	75	—	—	—
Nickel	420	420	420	21
Selenium	100	36	100	5.0
Zinc	7,500	2,800	2,800	140
Applies to:	All biosolids that are land applied	Bulk biosolids and bagged biosolids[c]	Bulk biosolids	Bagged biosolids[c]
From Part 503	Table 1, Section 503.13	Table 3, Section 503.13	Table 2, Section 503.13	Table 4, Section 503.13

[a] Dry-weight basis

Figura 37: Tabla de concentración de metales pesados para biosólidos clase B. Fuente: (EPA, 2011)

Para lograr reducir la cantidad concentración de patogenos y sustancias nocivas es necesario aplicar un metodo de estabilización a las heces y desechos humanos. Una alternativa como se menciono anteriormente es la digestión anaerobica, pero existen dos tipos de condiciones para que esta ocurra, en condiciones mesofilicas (35°C) y termofilica (50°C).

Según estudios realizados por varias instituciones realizado a lodos restantes, se demostro que bajo condiciones mesofilicas tanto en un reactor tipo batch como de alimentación continua, patogenos como la E.coli, coliformes fecales y Salmonella, se encontraban en cantidades importantes luedo del proceso de digestión anaerobia. Por lo que debido a efectos de temperatura y tiempo de retención hidraulica no fueron debidamente estabilizados **(Jiang et al., 2020)**.

Inactivation of Gram-negative bacteria in anaerobic digestion (a) *E. coli* (b) Coliforms and (c) *Salmonella*.

(a) *E. coli* Substrate	T (°C)	TS[a] (%)	Initial count (CFU[b]/g or mL)	Finial count (CFU/g or mL)	Log_{10} reduction	Tc[c]/HRT[d] (d)	Meet standard (Yes/no)
E. coli - Batch							
Dairy manure	25	1.39	6.5×10^7	$< 10^2$	>6	60	Y
Dairy manure	35		3.6×10^5	Below LOD[e]	3.6	62	Y
Nutrient broth/sludge liquid	35		10^8–10^9	10^6–10^8	1–2	20	N
Dairy manure	37	2.05	1.85×10^7	$< 10^3$	6	41	Y
Cow manure	37	6.6	6×10^4	Below LOD	4.94	6	Y
Chicken manure	37		2.3×10^7	35	5.8	35	Y
Food waste and pig manure	37	20	6.3×10^4	Below LOD	2.8	4	Y
Food waste and pig manure	37	20	7.9×10^8	Below LOD	6.9	7	Y
Chicken manure	42		1.7×10^7	27–34	5.7	9	Y
Dairy manure	52.5	1.75	2.5×10^7	Below LOD	>7	3.5	Y
Chicken manure	55		10^6	2–4	5.5	2 h	Y
Cow manure	55	6.6	6×10^4	Below LOD	4.37	40 min	Y
Nutrient broth/sludge liquid	55		10^8	Below LOD	8	20–60 min	Y
Cow manure	70	6.6	6×10^4	Below LOD	2.6	2 min	Y
E. coli - Continuous							
Swine manure	24	6.2–7.2	4.0×10^2–5.8×10^5		0.9–2.9	7, 14	N
Cattle manure	33	7	10^3	3×10^2	~0.5	55	Y
Primary sludge	35	3–5	5.02×10^5–1.3×10^6		1.48–1.68	12	N
Sludge	37.8	3.2	10^5–10^7	10^2–10^4	~2	50	N
Sewage sludge	38	3–4	3.6×10^5	8.4×10^3	1.6	14–20	N
Pig manure and food waste	39	5.8	$\sim 10^4$	$<3 \times 10^2$	1.5–2.5	41	Y
Pig manure and food waste	39	5.8	$\sim 10^4$	$< 10^2$	2–2.5	29	Y
Pig manure and food waste	39	5.8	$\sim 10^4$	$<3 \times 10^2$	1.5–2	21	Y
Manure and agriculture waste	39	6.3–9.3	1.5×10^4–8.5×10^4	0–1.9×10^3	0.9–4.2	20–28	N
Manure and agriculture waste	39–42	4.5–5.6	1.5×10^1–2×10^5	0–7×10^2	0–4.6	35–45	Y
Manure and agriculture waste	39	6.1–7.3	1.55×10^4–4.65×10^5	Below LOD	4.2–5.7	70	Y
Cattle manure	45	7		Below LOD	3	55	Y
Sludge	52.3–53.9	1.9–2.7	10^5–10^7	Below LOD	5–7	16–28	Y
Dairy cattle manure	55		0.54×10^6–1.44×10^6	$< 10^2$	>4	7.8	Y
Sewage sludge	55	3–4%	1.0×10^6	2	~6	9	Y

ColiformsPathogen				(CFU/g or mL)	(CFU/g or mL)		(d)	(Yes/n
Total coliforms and fecal coliform - *Batch*								
Fecal coliforms	Sludge	20	12	3.55×10^7 MPN[f]/g DM[g]	4.86×10^3 MPN/g DM	3–4	60	N
Coliforms	Swine slurry	22	12.5–13.5	10^5–10^6	$\sim 10^3$	2–3	25	Y
Coliforms	Cattle slurry	22	4	10^4–10^5	$\sim 10^2$	2–3	28	Y
Fecal coliforms	Sludge	35	12	3.55×10^7 MPN/g DM	$< 10^3$ MPN/g DM	4–5	20	Y
Total coliforms	Food waste and pig manure	37	20	3.2×10^5	Below LOD	3.5	4	Y
Total coliforms	Food waste and pig manure	37	20	1×10^9	Below LOD	7	7	Y
Coliforms	Swine slurry	38	12.5–13.5	10^5–10^6	Below LOD	3–4	3	Y
Coliforms	Cattle slurry	38	4	10^4–10^5	Below LOD	2–3	14	Y
Fecal coliforms	Sludge	38	3.8–8.3	10^6-10^8 MPN/g TS	$>10^3$ MPN/g TS	3–5	5	N
Coliforms	Swine slurry	55	12.5–13.5	10^5–10^6	Below LOD	3–4	1	Y
Coliforms	Cattle slurry	55	4	10^4–10^5	Below LOD	2–3	1	Y
Fecal coliforms	Sludge	55	12	3.55×10^7 MPN/g DM	$< 10^3$ MPN/g DM	4–5	20	Y
Total coliforms and fecal coliform - *Continuous*								
Total coliforms	Swine manure	24	6.2–7.2	6.0×10^2–1.5×10^6		1.0–2.9	7, 14	N
Fecal coliforms	Swine manure	24	6.2–7.2	5.0×10^2–1.6×10^6		0.9–3.0	7, 14	N
Coliforms	Cattle manure	33	7	10^3	10^2	1	55	Y
Fecal coliforms	Sludge	35		10^8-10^9 MPN/g TS	$>10^6$ MPN/g TS	2–3	15	N
Total coliforms	Sludge	35	3–4	4×10^5–1×10^6	10^5–10^6	0.48	20	N
Fecal coliforms	sludge	35	3–5	10^8 MPN/g TS	10^6-10^7 MPN/g TS	1–2	15	N
Total coliforms	Sludge	35	4.3–5.9	10^8–10^9	10^7–10^8	~1	20, 15, 10, 5	N
Total coliforms	Microwaved sludge	35	4.3–5.9	10^5–10^7	10^4–10^5	1–2	20, 15, 10, 5	N
Total coliforms	Sludge	37.8	3.2	10^6–10^8	10^2–10^5	~2	50	N
Coliforms 37 °C	Sewage sludge	38	3–4	1.6×10^6	5.0×10^4	1.5	14–20	N
Coliforms 44 °C	Sewage sludge	38	3–4	4.4×10^5	1.4×10^4	1.5	14–20	N
Total coliforms	PM[h] + FW[i]	39	5.8	10^7–10^8	10^4- $\times 10^6$	1–4	41	N
Total coliforms	PM + FW	39	5.8	10^7–10^8	10^5- $\times 10^6$	1–2	29	N

(c) *Salmonella* Substrate	T (°C)	TS (%)	Initial count (CFU/g or mL)	Finial count (CFU/g or mL)	Log_{10} reduction	Tc/HRT (d)	Meet standard (Yes/no)
Salmonella - Batch							
Swine manure	16		10^6–10^7	10^1–10^2	5	60	N
Sludge	20	12	81 MPN/g DM	27 MPN/g DM		60	N
Swine manure	22		10^6–10^7	10^1–10^2	5	60	N
Sludge	35	12	81 MPN/g DM	0 MPN/g DM		13	Y
Centrifuged liquid raw sludge	35		10^8–10^9	10^5–10^8	1–3	20	N
Dairy manure	35		7.4×10^3	Below LOD	1.9	133	
Swine manure	37		10^6–10^7	10^1–10^2	5	3	N
Food waste + pig manure	37	20	8.2×10^5	0	5.9	6	Y
Food waste + pig manure	37	20	5.9×10^3	0	3.8	7	Y
Sludge	55	12	81 MPN/g DM	0 MPN/g DM		3	Y
Centrifuged liquid raw sludge	55		10^8	0	8	20–60 min	Y
Salmonella - Continuous							
Swine manure	24	6.2–7.2	$<1 \times 10^2$–5.0×10^4		0.9–1.4	7, 14	N
Primary sludge	35	3–5	4.6×10^6–1.3×10^7 CFU/g DM		1.91–2.23	12	N
Sludge	35		6-10 MPN/4 g DM	4 MPN/4 g DM		15	N
Sludge	35	3–5	2-12 MPN/4 g DM	<1 MPN/4 g DM		15	Y

(c) *Salmonella* Substrate	T (°C)	TS (%)	Initial count (CFU/g or mL)	Finial count (CFU/g or mL)	Log_{10} reduction	Tc/HRT (d)	Meet standard (Yes/no)
1:1 primary + WAS[k]	35	3.24	16,000 CFU/100 mL	11,000 CFU/100 mL		15	N
sludge	37.8	3.2	Detected in 100% samples	Detected in 45% samples		50	N
1:1 primary + WAS	42	3.17	16,000 CFU/100 mL	8000 CFU/100 mL		15	N
1:1 primary + WAS	49	3.15	16,000 CFU/100 mL	5000 CFU/100 mL		15	N
Sludge	52.3–53.9	1.9–2.7	Detected in 100% samples	Not detected		16–28	Y
Sludge	55(15d)+35 (15d)		6-10 MPN/4 g DM	2 MPN/4 g DM		30	Y
Sludge	55(5d)+35 (15d)		6-10 MPN/4 g DM	1 MPN/4 g DM		20	Y
Sludge	55(3d)+35 (15d)		6-10 MPN/4 g DM	1 MPN/4 g DM		18	Y
Sludge	55(3d)+35 (12d)		6-10 MPN/4 g DM	2 MPN/4 g DM		15	Y
Dairy manure	55(4d)+35 (10d)	3.5–10.4	1000-1500 MPN/g DM	<1 MPN/g DM	>3	14	Y
sludge	62(1d)+35 (14d)		2-12 MPN/4 g DM	<1 MPN/4 g DM		15	Y
sludge	35(14d)+62 (1d)		2-12 MPN/4 g DM	<1 MPN/4 g DM		15	Y

Figura 38: Tablas de valores de Inactivación de bacterias Gram-negativas en la digestión anaeróbica (a) E. coli (b) Coliformes y (c) Salmonella. Fuente: (Jiang et al., 2020).

No obstante para la digestión anaerobica termofilica, la historia cambia. Se puede apreciar que los patógenos y coliformes son reducidos de manera optima y segura, por lo que al operar bajo estas condiciones es posible lograr unos lodos estabilizados. Así de esta forma calificar como biosólidos de tipo A.

Microorganism	Biological Sludge (UASB)	Digested sludge in MAD at 35° C with 31 days of treatment time	Digested sludge in TAD at 55° C with 28 days of treatment time	Maximum Permissible Limit NOM-004-SEMARNAT-2002		
				Class A	Class B	Class C
Faecal coliforms (Log MPN g^{-1} TS)	6	4	0	< 3	<3	< 6.3
Salmonella spp. (Log MPN.g^{-1} TS)	5	3	0	<0.47	<0.47	<2.47
Helminth ova (HO.g^{-1} TS)	13	13	0.25	<1 [(a)]	< 10	< 35

Note: [(a)] Viable helminth ova; HO: helminth ova; MPN: most probable number

Figura 39: Efecto de la digestión anaeróbica mesófila y termófila en la inactivación de microorganismos patógenos. Fuente: (Pliego-Arreaga et al., 2013).

Pero trabajar en condiciones termofilicas tiene sus desventajas, ya aunque la producción de metano pueda ser mayor en ciertos casos según los siguientes graficos, el proceso es en general mas inestable y depende mucho de las caracteristicas del substrato . Ademas que la digestión bajo condiciones termofilicas requiere de mas energía y la mayoría de los biodigestores trabajan en condiciones mesofílicas, por lo que adquirir los inoculos para operar bajo estas condiciones es mas complicado y costoso. **(Pliego-Arreaga et al., 2013)**.

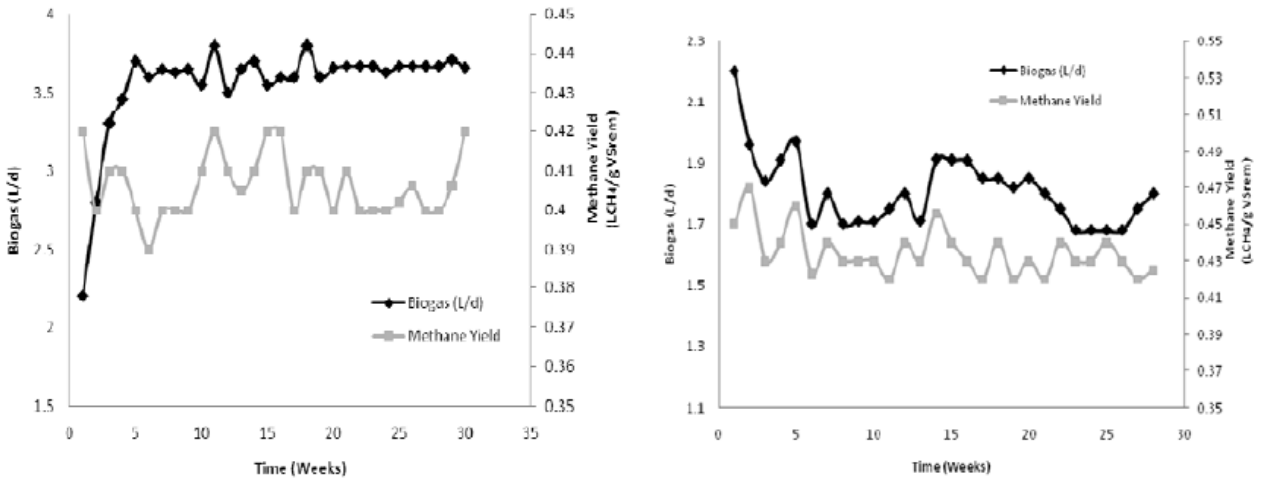


Figura 40: Producción de biogás bajo el régimen termofílico (izquierda) y mesofílico (derecha) Fuente: (Pliego-Arreaga et al., 2013)

Otro tema muy importante tambien es el de la precencia de antibióticos y hormonas en las

heces. Esto aunque ha ido disminuyendo con los años es otro tema controversial debido a que los seres humanos consumen una gran cantidad de remedios y alimentos con un alto contenido de estos compuestos para tratar diferentes enfermedades, los cuales el cuerpo expulsa y son altamente nocivos una vez degradados, por lo que al reutilizar los lodos es necesario analizar la precencia de estos en el digestato para que no afecten de forma negativa el suelo en donde se planea fertilizar utilizando estos desechos como biomasa. Este fenomeno al igual que los patogenos se ve afectado de gran manera por la temperatura.

Según una investigación se logro comprobar el rango de remoción de estas sustancias es de 0 a 100% según el tipo de antibiotico y temperatura de trabajo. Bajo el regimen termofilico se demostro que la eliminación de antibioticos y bacterias resistentes de antibioticos es mas efectiva que bajo condiciones mesofilicas **(Youngquist et al., 2016)**.

Class	Antibiotic	Reactor type†	Matrix	Method	Percent removal	Reference
Sulfonamide	sulfamethoxazole	sequencing batch reactor, 35°C	synthetic pharm. wastewater	spiked	37	Aydin et al. (2014)
	sulfamethoxazole	batch reactor, 37°C	swine manure	spiked	99.9	Mohring et al. (2009)
	sulfamerazine	batch reactor, 37°C	swine manure	spiked	100	Mohring et al. (2009)
	sulfadiazine	batch reactor, 37°C	swine manure	spiked	99.9‡	Mohring et al. (2009)
	sulfadimethoxine	batch reactor, 37°C	swine manure	spiked	99.6	Mohring et al. (2009)
	sulfamethoxypyridazine	batch reactor, 37°C	swine manure	spiked	72.3	Mohring et al. (2009)
	sulfathizaole	batch reactor, 37°C	swine manure	spiked	0	Mohring et al. (2009)
	sulfamethazine	batch reactor, 37°C	swine manure	spiked	0	Mohring et al. (2009)
	sulfamethazine	batch reactor, 37°C	dairy manure + sludge	spiked	0	Mitchell et al. (2013)
Tetracycline	chlortetracycline	batch reactor, 35°C	beef calf manure	excreted	75‡	Arikan (2008)
	chlortetracycline	batch reactor, 35°C	swine manure	spiked	90–92	Álvarez et al. (2010)
	chlortetracycline	batch reactor, 22, 38, 55°C	swine manure	excreted	7, 80, 98	Varel et al. (2012)
	oxytetracycline	batch reactor, 35°C	beef calf manure	excreted	59‡	Arikan et al. (2006)
	oxytetracycline	batch reactor, 35°C	swine manure	spiked	53–68	Álvarez et al. (2010)
Diaminopyrimidine	trimethoprim	batch reactor, 37°C	swine manure	spiked	100	Mohring et al. (2009)
Macrolide	tylosin	batch reactor, 37°C	dairy manure + sludge	spiked	100‡	Mitchell et al. (2013)
	erythromycin	sequencing batch reactor, 35°C	synthetic pharm. wastewater	spiked	40	Aydin et al. (2014)
Amphenicol	florfenicol	batch reactor, 37°C	dairy manure + sludge	spiked	100‡	Mitchell et al. (2013)
Penicillin	ampicillin	batch reactor, 37°C	dairy manure + sludge	spiked	100	Mitchell et al. (2013)

† All studies were conducted on a laboratory scale.

Figura 41: Remoción de antibióticos bajo el régimen mesofílico. Fuente: (Youngquist et al., 2016)

Aunque en el caso de operar mediante esta ultima tambien puede ser viable mientras se tenga un metodo secundario de estabilización como lo es por ejemplo el compostaje. Se corroboró que utilizando el compostaje bajo ciertas condiciones de temperatura y en un

tiempo de operación de 0.9 a 16 días se produce una remoción bastante aceptable de los antibioticos y bacterias resistentes a los antibioticos. Por lo que esta comprobado que el compostaje es un buen metodo secundario de estabilización de las heces humanas posterior al tratamiento anaerobio **(Youngquist et al., 2016)**.

Class	Antibiotic	Compost system†	Matrix	Method	Extractable antibiotics		$T_{1/2}$	Reference
					Initial	Final		
		d			—— mg kg^{-1} dry wt. ——		d	
Sulfonamide	sulfadiazine	in-vessel (40)	poultry	spiked	30.64	below MQL‡	1.4	Ho et al. (2013)
	sulfadiazine	in-vessel (3)	swine	spiked	10	BDL§	–	Selvam et al. (2012a)
	sulfamethazine	windrow (35)	turkey	spiked	10.8¶	no change	–	Dolliver et al. (2008)
	sulfamethazine	windrow (63)	beef feedlot	excreted	0.15	0.018	27	Cessna et al. (2011)
	sulfamethazine	in-vessel (32)	swine	spiked	32	82–100% reduction#	–	Wang et al. (2015a)
	sulfamethazine	in-vessel (21)	biosolids	spiked	4.2	0.052	–	Mitchell et al. (2015)
	sulfamethazine	in-vessel (21)	dairy	spiked	2.2	0.065	–	Mitchell et al. (2015)
	sulfadimethoxine	in-vessel (21)	biosolids	spiked	0.51	1.2×10^{-4}	–	Mitchell et al. (2015)
	sulfadimethoxine	in-vessel (21)	dairy	spiked	0.41	9.8×10^{-3}	–	Mitchell et al. (2015)
Tetracycline	oxytetracycline	in-vessel (35)	beef calves	excreted	115	$<2.4 \times 10^{-4}$	3.2	Arikan et al. (2007)
	oxytetracycline	in-vessel (45)	poultry + swine	spiked	60	0.9–1.6	–	Hu et al. (2011)
	oxytetracycline	windrow (52)	swine	spiked	1.6	92% reduction#	1.1	Wu et al. (2011)
	oxytetracycline	in-vessel (32)	swine	spiked	50	41–90% reduction#	–	Wang et al. (2015a)
	chlortetracycline	windrow (52)	swine	spiked	2.9	74% reduction#	8.2	Wu et al. (2011)
	chlortetracycline	windrow (10)	turkey	spiked	1.5¶	>99% reduction#	0.9	Dolliver et al. (2008)
	chlortetracycline	in-vessel (30)	beef calves	excreted	113	0.7	4	Arikan et al. (2009)
	chlortetracycline	in-vessel (21)	swine	spiked	50	undetected	–	Selvam et al. (2012a)
	chlortetracycline	in-vessel (45)	poultry + swine	spiked	60	1.7–2.3	–	Hu et al. (2011)
	doxycylcline	in-vessel (40)	poultry	spiked	13.64	0.027	3.8	Ho et al. (2013)
Diaminopyrimidine	trimethoprim	in-vessel (40)	poultry	spiked	21.98	0.022	3.7	Ho et al. (2013)
Quinolone	ciprofloxacin	in-vessel (56)	swine	spiked	10	1.71	–	Selvam et al. (2012a)
	enrofloxacin	in-vessel (40)	poultry	spiked	36.77	0.014	2.8	Ho et al. (2013)
	norfloxacin	in-vessel (40)	poultry	spiked	5.09	below MQL	2.1	Ho et al. (2013)
	flumequine	in-vessel (40)	poultry	spiked	42.03	below MQL	1.3	Ho et al. (2013)
Macrolide	tylosin	in-vessel (40)	poultry	spiked	62.57	below MQL	2.2	Ho et al. (2013)
	tylosin	windrow (35)	turkey	spiked	3.7¶	76% reduction#	16	Dolliver et al. (2008)
	tylosin	windrow (63)	beef feedlot	excreted	0.041	9.8×10^{-3}	43.5	Cessna et al. (2011)
	tylosin	in-vessel (21)	dairy	spiked	2.8	0.061	–	Mitchell et al. (2015)
	tylosin	in-vessel (21)	biosolids	spiked	2.3	0.099	–	Mitchell et al. (2015)
	erythromycin	in-vessel (40)	poultry	spiked	15.58	below MQL	1.4	Ho et al. (2013)
	tilmicosin	in-vessel (40)	poultry	spiked	5.24	below MQL	2.2	Ho et al. (2013)
Coccidostat ionophore	salinomycin	in-vessel (38)	poultry	excreted	22	99% reduction#	1.3	Ramaswamy et al. (2010)
Amphenicol	florfenicol	in-vessel (21)	dairy	spiked	0.23	$<2.6 \times 10^{-4}$	–	Mitchell et al. (2015)
	florfenicol	in-vessel (21)	biosolids	spiked	0.24	0.012	–	Mitchell et al. (2015)

Figura 42: Remoción de antibióticos mediante el método de compostaje. Fuente: (Youngquist et al., 2016)

6.1.4. Reutilización de la Orina

Debido a que se utilizara un baño seco para la recepción y transporte de las heces, este tipo de baño cuenta con una separación de las fecas y la orina. Es por eso que se hace necesario encontrar un tratamiento o disposición de la orina acumulada en el sistema. Para esto se tienen dos planteamientos.

Una idea es reciclar la orina mediante un sistema de membranas y procesos quimicos como la electrolisis para obtener agua. Existen varios proyectos a nivel internacional que estan trabajando en este tipo de proyectos, sobre todo en universidades y empresas de transporte como lo es la NASA. En efecto en la estación espacial internacional cuentan con un sistema para transformar la orina de los astronautas en agua bebible **(Membranes, 2020)**. Aunque lo que se busca esta lejos de la complejidad y grado tecnologico de este caso, se han diseñado prototipos mas basicos y simples de utililizar en diferentes estudios a nivel mundial. Estos basicamente funcionan realizando un pre-tratamiento a la orina y haciendola circular mediante un sistema de filtros y elevando la temperatura de esta hasta en alrededor de 40°C para posteriormente dirigirla hacia una membrana hidrofobica en donde se seperan las moleculas de agua y amoniaco. Luego el concentrado de orina posterior puede ser usado como abono o fertilizante para diferentes terrenos **(Separation and Purification Technology, 2019)**. Se ha comprobado que mediante este sistema de puede recuperar hasta un 75% del volumen de la orina en agua, que es bastante superior a lo que se obtiene actualmente al desalinizar agua de mar **(Derese, S., & Verliefde, A. 2016**). De esta forma no solo se puede obtener biogas del baño seco sino tambien agua que es tan necesario en lugares donde el acceso a este recurso es mas dificil

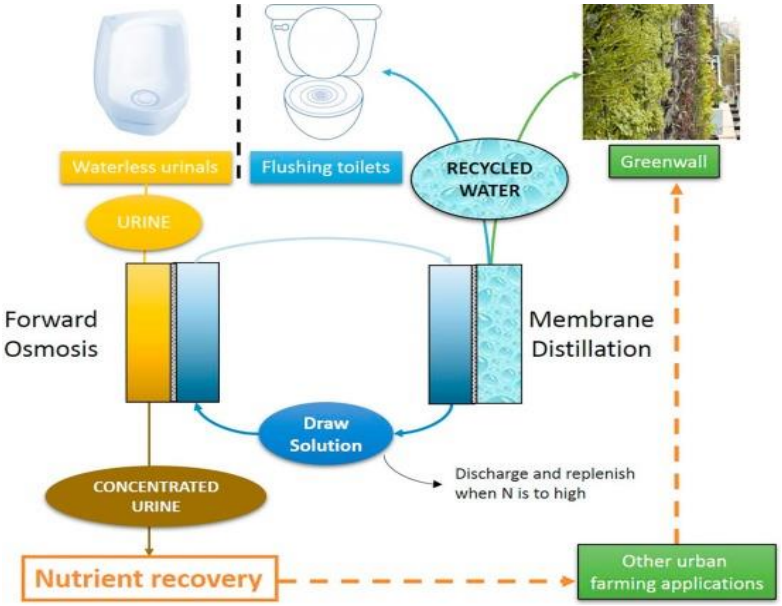


Figura 43: Esquema de un sistema de purificación de orina por osmosis directa. Fuente: (Volpin et al., 2019)

La segunda idea es solo utilizar la orina directamente como bioliquido para fertilizar, debido a que la orina tiene grandes cantidades de fosforo y nitrogeno que son vitales para el crecimiento de las plantas. Para esto se le debe realizar un tratamiento a la orina para que este apta para estas condiciones.

6.2. Etapa 2: Planificación

6.2.1. Asignación de Subsistemas

Acorde a la investigacion realizada en el item anterior, se procede a asignar los diferentes sub sistemas en una tabla para mayor claridad del proyecto, los cuales tienen por fin mejorar la producción de biogas en conjunto con el tratamiento de residuos posterior a la digestioón anaerobica.

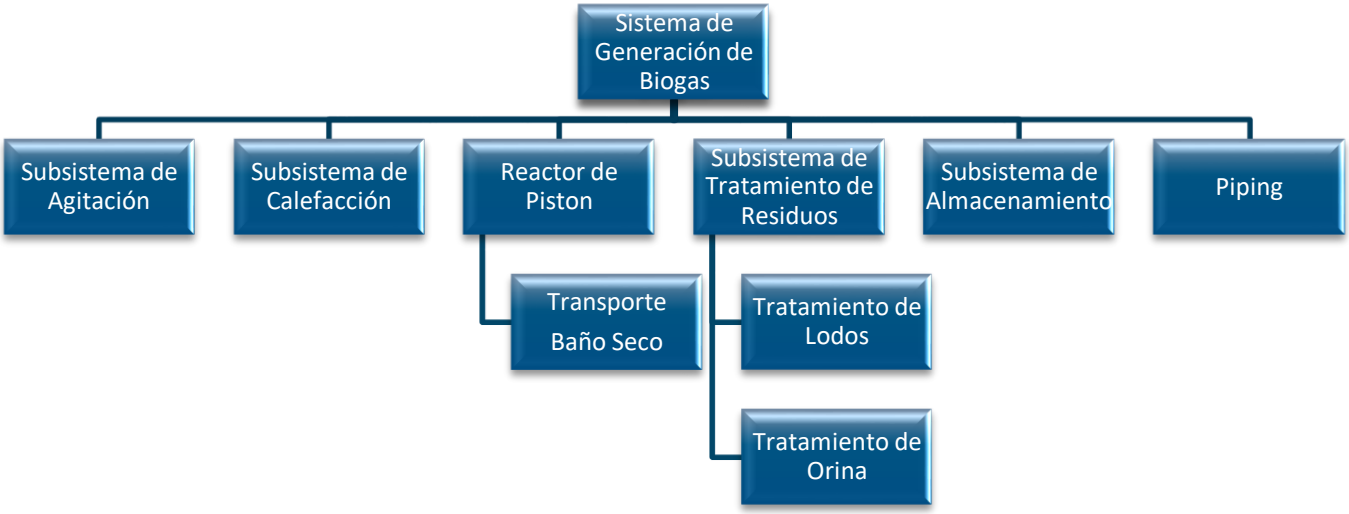


Tabla 4: Asignación de subsistemas

6.3. Etapa 3: Definición del Proyecto

6.3.1. Funcionalidad

La funcionalidad principal del sistema de generación a grandes rasgos la de obtener energía en forma de biogas y recursos valiosos como el abono para la tierra de un elemento residual como son las heces humanas y otros desechos hogareños, permitiendo asi el correcto tratamiento de estos para mejorar la higiene, evitar enfermedades y la contaminación del ecosistema circundante. Así de esta forma mejorar la calidad de vida de familias vulnerables que vivan en lugares alejados de sectores urbanos y junto con esto entregar sus respectivos elementos basicos para sobrevivir como el agua y energía para los. ¿Como se pretende lograr esto?. A continuación se detalla todo los pasos y procesos por los que pasan los desechos hasta convertirse en elementos de utilidad.

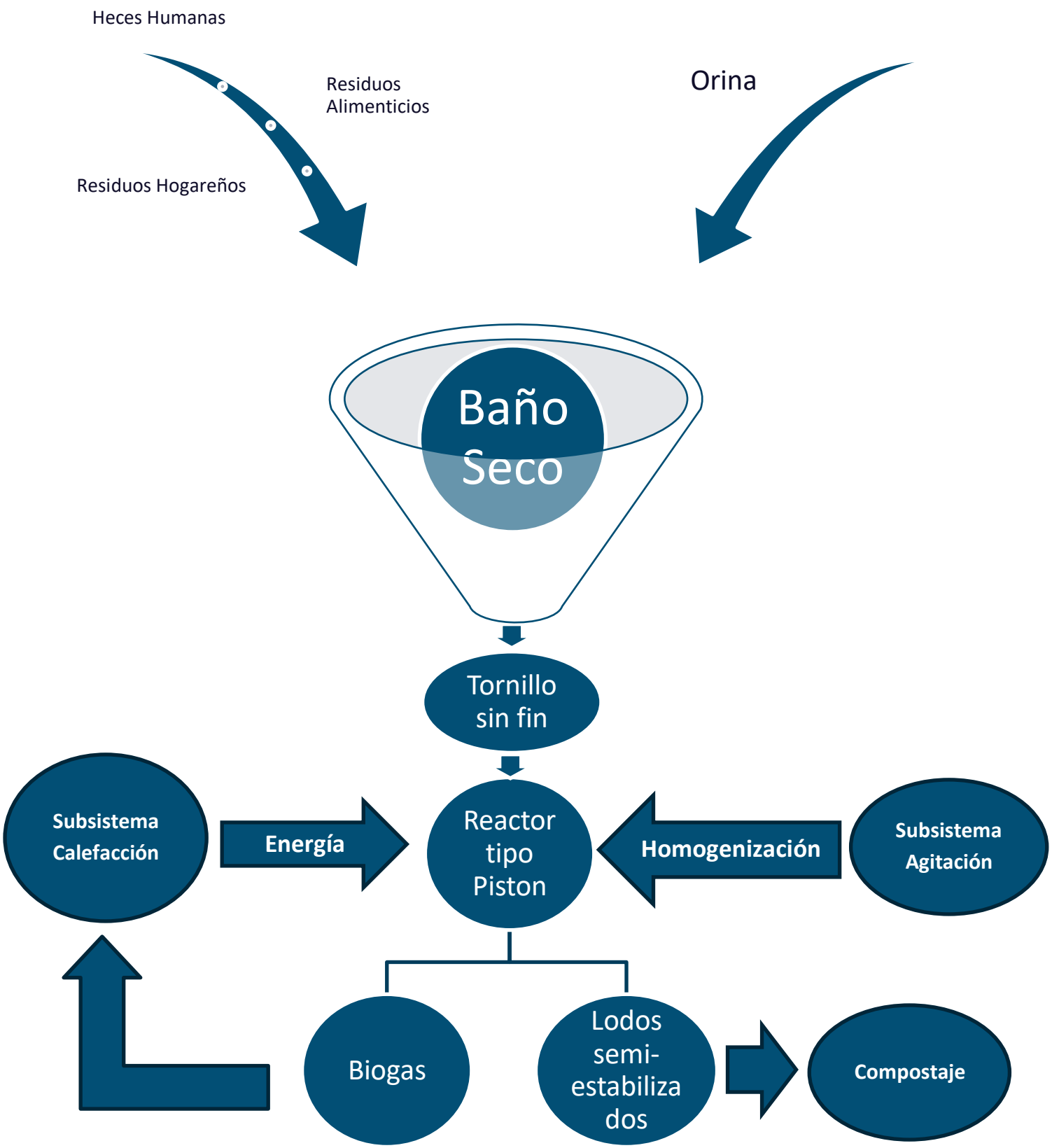


Tabla 5: Esquema de funcionalidad del sistema de generación y baño seco.

6.3.2. Especificaciones:

El diseño en general debe cumplir con ciertos requisitos para que sea viable tanto su funcionamiento como su respectiva mantención. Para esto se dictaron una serie de condiciones y parametros de funcionamiento de los equipos y subsistemas, ademas de determinar los factores externos que deben considerarse a la hora de diseñar y promover el proyecto.

Concepto	Descripción
Entorno donde opera	Resistente a la humedad Materiales Anticorrosivos
Servicios Externos	Subsistemas de apoyo de funcionamiento Uso de equipos debe ser sencillo y adaptable a diferentes circunstancias Debe ser de fácil limpieza Las mantenciones invasivas deben ser mínimas La instalación y el armado no deben ser complejos, sino mas bien universales. Debe contar con instrumentos de control de parámetros operacionales y toma de muestras.
Aspectos de Fabricación	Dimensiones deben ser acorde al tamaño de la habitación (1,5 x 1,5 m) Los materiales usados deben ser antioxidantes y anticorrosivos Materiales antideslizantes Conexiones eléctricas y tuberías deben estar planteadas de forma clara
Aspectos Económicos	Diseño debe ser de bajo costo y presentar alternativas El mantenimiento debe ser confiable y económico
Aspectos Legales	Cumplimiento de normas de fabricación internacionales y estándares de saneamiento mejorado Separación de heces y orina Tratamiento de lodos eficiente
Política General	Consciente con el entorno y sustentable.

Tabla 6: Especificaciones del sistema

6.4. Etapa 4: Diseño

6.4.1. Prototipo Inicial

El diseño y modelación de los subsistemas estan basados en un prototipo inicial diseñado por Cristian Oliden, cuya memoria se enfoco en la creación de un reactor tipo piston debido a su facil uso, bajo costo y minima mantención. Por lo que es importante decir que para desarrollar este sistema de generación se tomo como base el diseño de este prototipo. A continuación se describira a grandes rasgos este prototipo y sus caracteristicas. De ser necesaria mas información para saber como se diseño y su funcionamiento se puede rescatar el trabajo de titulo en las referencias de esta tesis.

Para el diseño del primer prototipo se tomo como parametros bases la recepción, el transporte y el tratamiento de las heces y orina. Primero para la recepción de los desechos se tomo como modelo basico el de los inodoros convencionales, pero debido a que el objetivo del proyecto es no utilizar agua se opto por un inodoro de tipo seco, en donde se tiene una separación de las heces y la orina para el posterior tratamiento. Este tipo de baño consiste en un inodoro convencional pero con la excepción de que en la entrada de la taza del baño, se coloca un separador de orina y heces, esta separación se hizo según medidas geometricas estandar de diferentes modelos comerciales en donde se minimiza la entrada de orina al ducto de heces para así generar un mejor tratamiento de los residuos solidos. Cabe decir tambien tambien que posterior a la separación, cada cavidad tiene su ducto correspondiente de evacuación. Para el caso de la orina esta va a dar a un estanque de acumulación de orina, mientras que las heces van hacia el subsistema de transporte para el biodigestor. Tanto la taza como el separador pueden ser fabricados en una impresión 3D para abaratar costos, lo ideal que sea de algun material impermeable y anticorrosivo como la fibra de vidrio con algun recubrimiento de resina, ceramica o el poliestireno. Ademas de la taza y el separador, se necesita un soporte que pueda sostener la taza, con las dimensiones y resistencia necesaria para soportar el peso de una persona.

Figura 44: Diseño inodoro en Autodesk Inventor 2020. Fuente: (Tesis Oliden. C, 2020)

Dentro de la recepción se encuentra un sistema de descarga en donde se depositan las heces o desechos domiciliarios. Este aparato consiste en una cavidad semicircular la cual se puede accionar de manera manual para girarla 180° grados y de esta manera depositar el contenido de los residuos en el ducto de heces el cual se encuentra en la parte inferior de la cavidad. Este mecanismo gira en torno a si mismo debido a la precencia de un eje que atraviesa la cavidad y permite el movimiento radial de arriba hacia abajo.

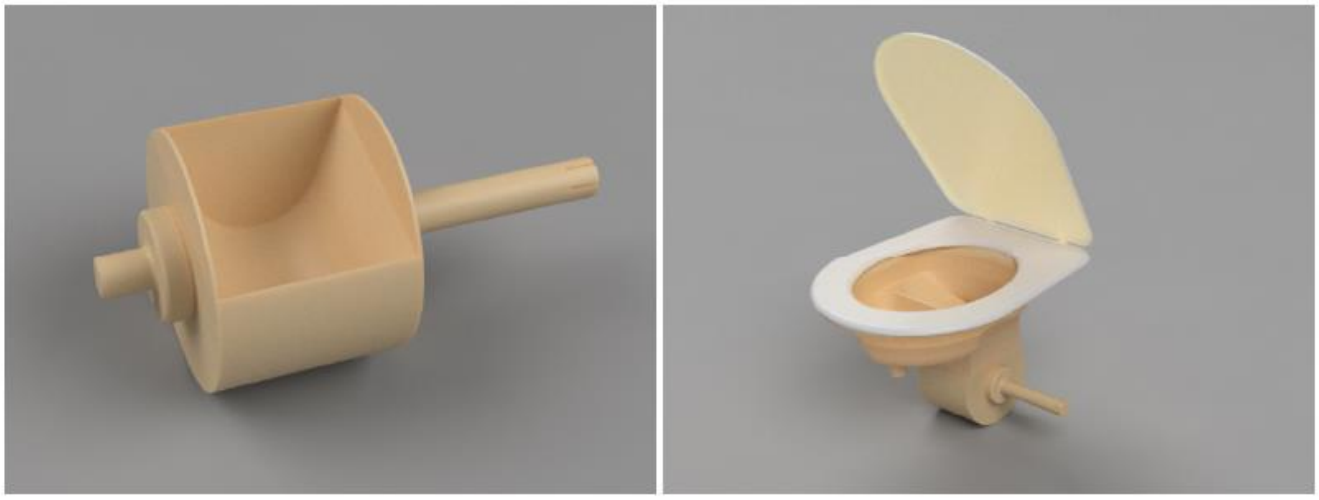


Figura 45: Diseño modelado en Autodesk Inventor. Fuente: (Tesis Oliden. C, 2020)

Cabe destacar que para permitir el correcto deslizamiento de los desechos, se pretende diseñar este sistema con algun material deslizante como la resina epoxica o silicona de corcho, ademas de poder soportar la corrosión y evitar el crecimiento de microorganismos.

Luego los residuos son depositados en el ducto de heces el cual se encuentra justo de bajo del sistema de descarga. Se considero un ducto de perfil cuadrado igual al sistema de descarga. Las paredes del ducto seran verticales para disminuir el contacto con las heces. Junto con esto se diseño un soporte para este ducto que se encuentra en la parte externa del sistema. Este debe ser fabricado de un material anticorrosivo y deslizante como el acero galvanizado

Figura 46: Ducto de descarga con estructura de soporte diseñado en Autodesk Inventor. Fuente: (Tesis Oliden. C, 2020)

Ahora pasando al proceso de transporte de los desechos se planteo lo siguiente. Debido a que el sistema en general no debe utilziar agua se hizo bastante complejo diseñar un sistema de transpórte que sea viable, facil de construir e implementar y economico. Como se sabe los baños convencionales usan agua para poder transportar las heces y orina hacia el sistema de alcantarillado, pero en este caso debido a que las condiciones sanitarias son diferentes se debio pensar en una solución que no involucre agua para ello. En esto surgio la idea de implementar un tornillo sin fin el cual funcione como instrumento que logre empujar y trasladar las heces hacia el biodigestor. Por lo que al caer las heces por el ducto, estas se depositaran en el tornillo el cual mediante un mecanismo de giro manual, producira el movimiento necesario para impulsar las heces hacia el reactor.

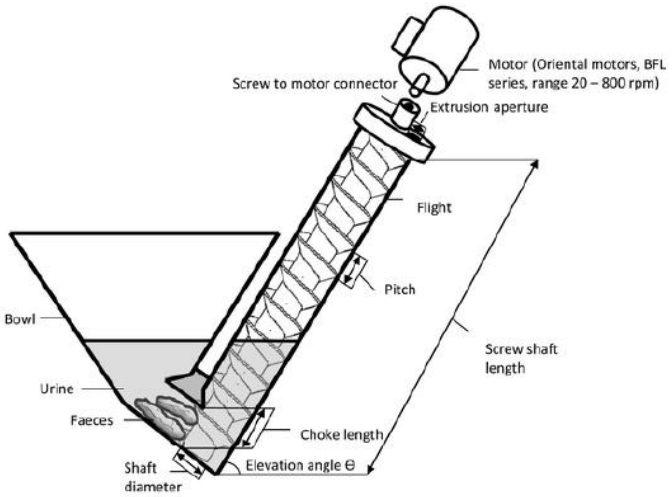


Figura 47: Representación de tornillo separador de orina y heces. Fuente: (Mercer et al., 2016).

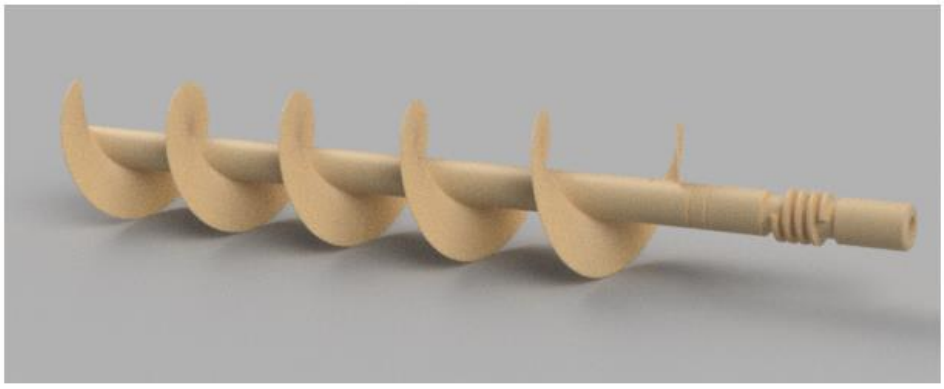


Figura 48: Diseño tornillo sin fin para transporte de heces en Autodesk Inventor. Fuente: (Tesis Oliden. C, 2020)

Finalmente en la etapa del tratamiento se planteo el diseño de un biodigestor de tipo horizontal. El dimensionamiento del biodigestor se hizo pensando en la alimentación que este tendría al día. Para esto se asume un hogar de 5 personas en donde se tiene una descarga diaria de heces de aproximadamente 3.06 [L/día]. A partir de esto y considerandop otros parametros como el porcentaje de solidos volatiles totales y un tiempo de retención hidraulico de 30 días se planteo un volumen aproximado de 138 litros.

Luego para la geometría del reactor se opto por que fuera cilindrica debido al lugar de isntalación y sus caracteristicas de funcionamiento las cuales se mencionan a continuación.

- Configuración de trabajo por flujo continuo
- Flujo tipo piston con un pórcentaje de solidos totales mayor al 10%
- Garantiza que todos los lodos provenientes del baño pasen por el proceso de digestion anaerobica.
- Fabricado de materiales anticorrosivos y resistentes a microorganismos, con la pósibilidad de colocar revestimientos antisepticos.

Las dimensiones especificas del reactor considerando todos los factores anteriores mencionados son de 350 [mm] de ancho y 1400 [mm] de largo.

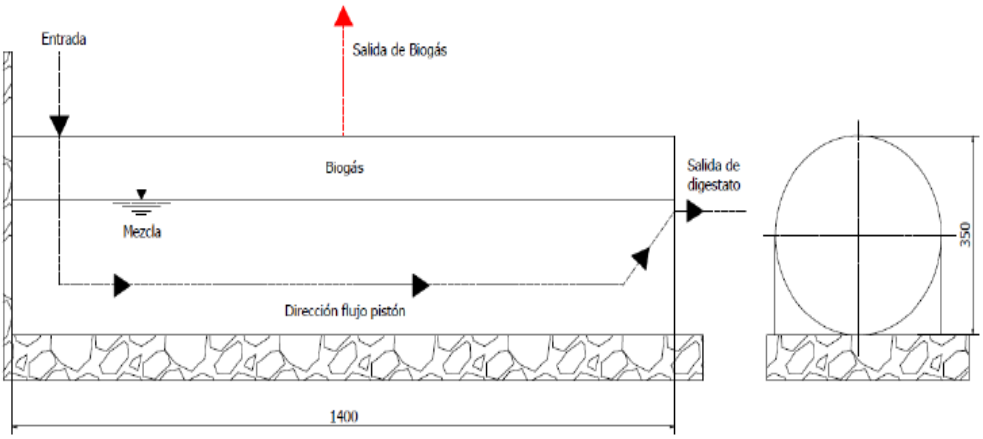


Figura 49: Esquema del biodigestor propuesto. Fuente: (Tesis Oliden. C, 2020)

6.4.2. Diseño del Detalle

6.4.2.1. Subsistema Calefacción

Para el diseño del equipo de calefacción, que tiene como fin entregar la energía suficiente para poder llevar acabo una correcta digestión anaerobica de los desperdicios y obtener una mayor producción de biogas, se planteo dos formas y equipos diferentes para poder otorgarle esa energía necesaria al sistema. Debido a que uno de los objetivos principales de este sistema de generación es que sea autosustentable y utilize la menor cantidad de energía externa posible se tomo como base para una de las opciones un colector solar.

El colector solar es un equipo de tamaño medio el cual no utiliza electricidad o algun otro tipo de energía, sino que aprovecha la radiación solar para calentar agua almacenada en un estanque mediante el fenomeno de radiación la cual es dirigida mediante una placa metalica llamada absorberdor la cual capta los rayos solares para luego transformarlos en calor y trasmitirla al fluido en cuestión, que en este caso es agua.

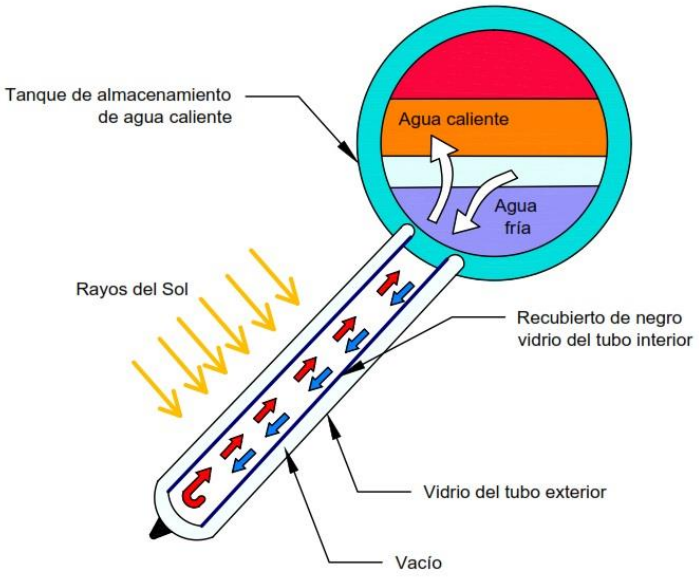


Figura 50: Funcionamiento de un colector solar simple.

Para el diseño de un colector solar se tomaron dos parametros, la energía que se le debe entregar al biodigestor para que funcione de manera eficiente y la cantidad de agua necesaria

para poder mantener un flujo constante de calor a este. Para el caso de la energía gracias a un analisis realizado en el diseño del prototipo inicial, se logro determinar que la energía que se le debe entregar al reactor para mantener una producción rentable de biogas es de 407 [W] en el regimen mesofilico. Esto debido a que esta cantidad de energía se pierde debido a efectos de conducción y convencción al interior del biodigestor. Este no es un gran valor por lo que se determino que un colector solar de pequeñas dimensiones se encuentra mas que capacitado para entregar esta energía.

Posteriormente para la cantidad de agua minima que se necesita para mantener un flujo constante de energía hacia el biodigestor se hizo un analisis rapido según las dimensiones del biodigestor y el área de contacto disponible para entregar la energía. Para este caso se determino que lo mas simple y barato es implementar una tuberia de cobre alrededor del reactor como un serpentin, similar a los intercambiadores de calores ordinarios. De esta forma la energía se transmitira mediante conducción de las tuberias hacia las paredes del biodigestor y luego por convección a los desechos que se encuentren al interior. Esto permite mantener una temperatura de entre 30°C y 35°C al interior del reactor, perfecto para el regimen mesofilico y el correcto desempeño de los inoculos en los procesos anaerobios.

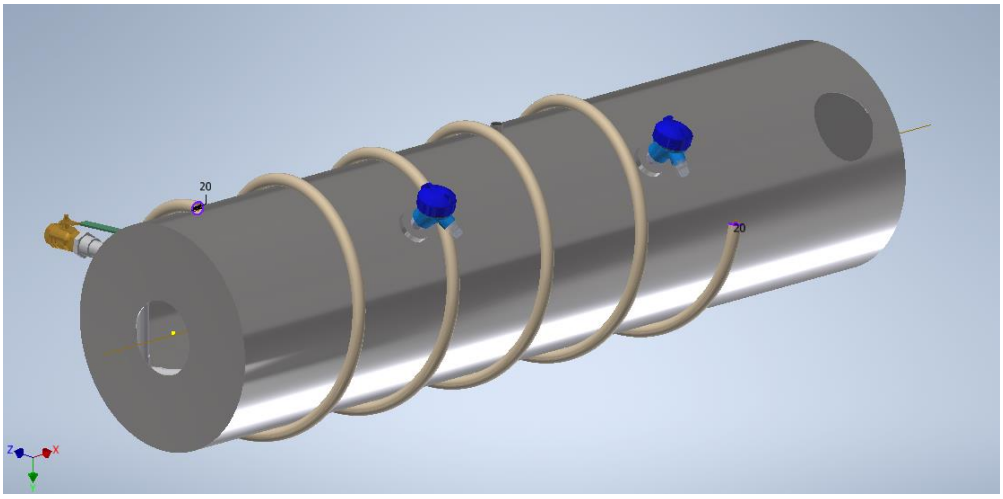


Figura 51: Diseño serpentín de calefacción biodigestor en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia

Dadas todas las condiciones se llego a la conclusión de que un colector solar de 50 litros

basta y sobra para lograr lo anterior. Esta elección se hizo debido a que es el colector comercial con menor capacidad que se logro encontrar en el mercado y además el mas economico para los requerimientos y usos del proyecto.

Figura 52: Representación de colector solar en el sistema de calefacción en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia

A continuación se muestra una tabla con el costo de implementación de este equipo.

Elemento	Cantidad	Costo
Colector solar	1	$57.584 CLP
Tuberías de Cobre Rollo de 15m	1	$80.000 CLP
Válvula 3 vías	2	$30.000 CLP
Válvula Reguladora de Gas	1	$ 15.000 CLP
Total		$177.584 CLP

Tabla 6: Costos del equipo de calefacción solar.

La segunda opción que se plantea en esta tesis es la utilización de un equipo simple de

calentamiento de agua muy similar a lo que hoy en día conocemos como calefon

El calefon es un equipo cuya funcion es calentar agua para diversos usos cotidianos mediante el uso de un quemador de gas que calienta una placa que esta en contacto con las tuberias de agua, permitiendo de este modo mediante el fenomeno de conducción y convección elevar la temperatura del agua. Basicamente lo que se penso fue un diseño simple y sencillo de un equipo con el mismo principio del calefon pero en este caso para el calentar el agua que se utilizara para mantener el biodigestor a una temperatura lo mas constante posible. Se decidio por establecer este equipo como sistema auxiliar para el colector solar, ya que debido a las grandes variaciones en la intensidad de la radiación solar que se pueden experimentar quizas no siempre se logre la energía necesaria para calentar el agua pero debido a que no se requiere una gran cantidad de energía para mantener el reactor a la temperatura adecuada. Pero no obstante conviene tener este equipo como sistema alternativo ante cualquier imprevisto, ademas que se le puede dar otros usos como por ejemplo calentar el agua para usos domesticos y tambien como metodo de quemar el biogas restante al cual no se le dara uso. Junto con esto una de las ideas principales de este equipo es que funcione con el mismo biogas que se produce en el biodigestor.

Para el diseño de este equipo se tomo en cuenta como se dijo anteriormente el funcionamiento base de un calefon convencional y un intercambiador de calor casero de agua. Así se logro llegar a un diseño bastante simple y eficiente de un calentador de agua el cual puede ser diseñado facilmente en una impresora 3D o manualmente un taller metalmecánico.

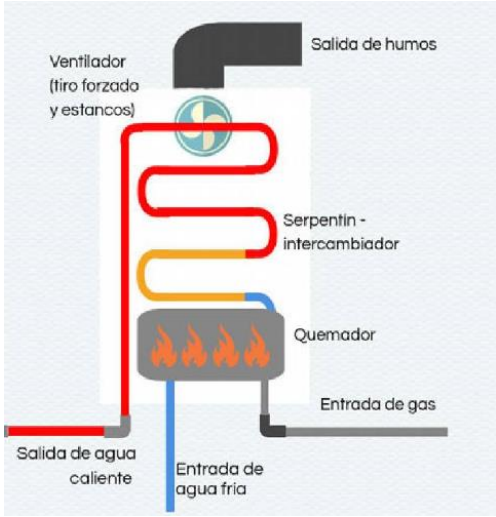


Figura 53: Esquema de funcionalidad de un calefón convencional.

El primer componente es la carcasa que tendra como función contener todo el calor y gases de combustión y evitar que se expandan por la habitación circundante. Se planteo un diseño personal el cual consiste en una pared rectangular cerrada con un orificio de la misma forma en la parte superior para la salida de los gases de combustión y uno en la zona inferior para la entrada de oxigeno y así generar una buena combustión en el quemador. Al interior ademas se tiene un soporte circular para el intercambiador de calor que se encargara de traspasar la energía al agua. El material de la carcasa puede ser de algun polimero que sea resistente al calor y rigido o de aluminio.

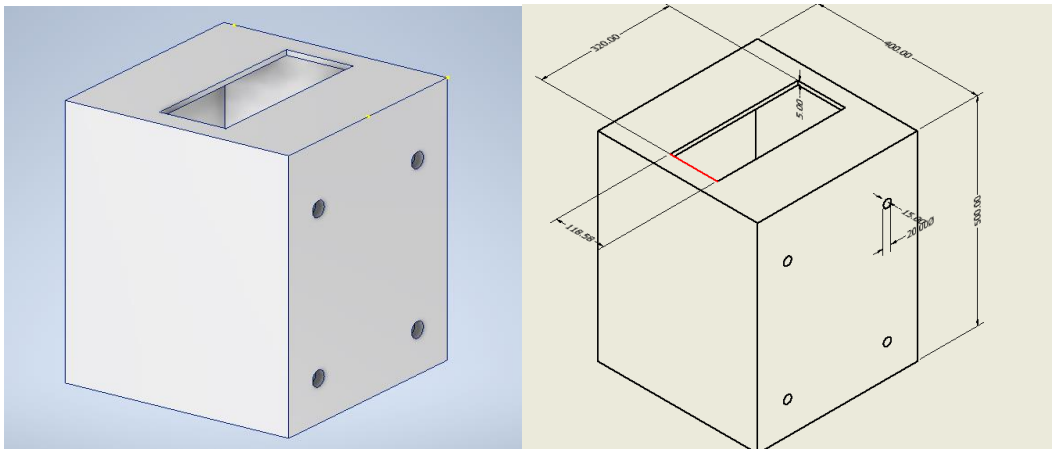


Figura 54: Diseño carcasa equipo de calefacción a biogás en Autodesk Inventor 2020.
Fuente: Elaboración Propia

El segundo componente es el intercambiador de calor. Para esto se tomo en consideración una forma basica y simple para una mejor adherencia de las tuberias y ademas que sea facil

de conseguir en el mercado. Por lo que se diseñó como un cilindro de cobre con una rejilla superior en donde iran las tuberias soldadas, para así entregar toda la energía posible al fluido y facilitar su instalación. La rejilla ira soldada al intercambiador y este a su vez sera adherido al soporte de la carcasa mediante resina epoxi o soldadura dependiendo del material que se fabrique la carcasa. Asimismo las tuberias de cobre iran soldadas al intercambiador

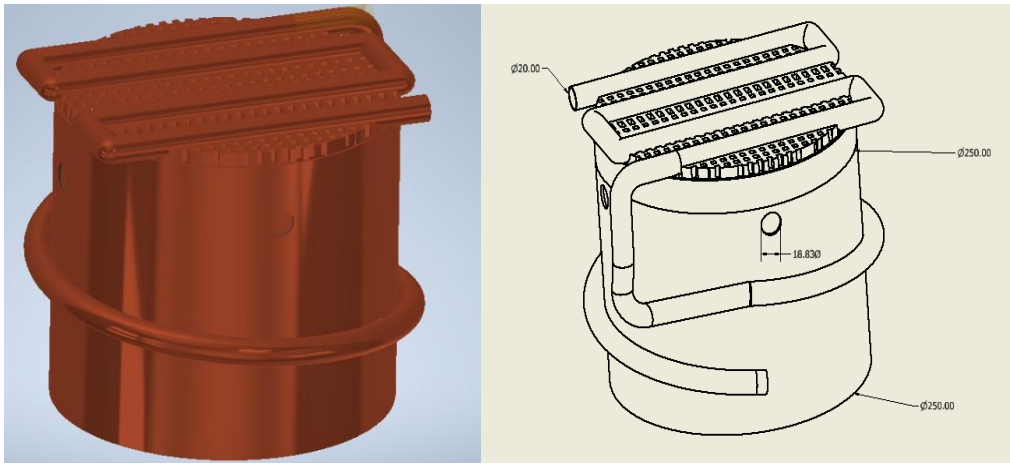


Figura 55: Diseño intercambiador de calor equipo de calefacción a biogás en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia.

El tercer componente viene a ser un objeto que permita el correcto escape de los gases de combustión hacia el exterior. Para esto se planteo el diseño de una campana similar a la de las cocinas convencionales la cual ira en la parte superior del intercambiador de calor, adherido a este mediante pernos. Esta campana sera de aluminio y podra ser diseñada en una impresora 3D o en un taller metalmecanico debido a su compleja geometría en comparación con el resto de los componentes.

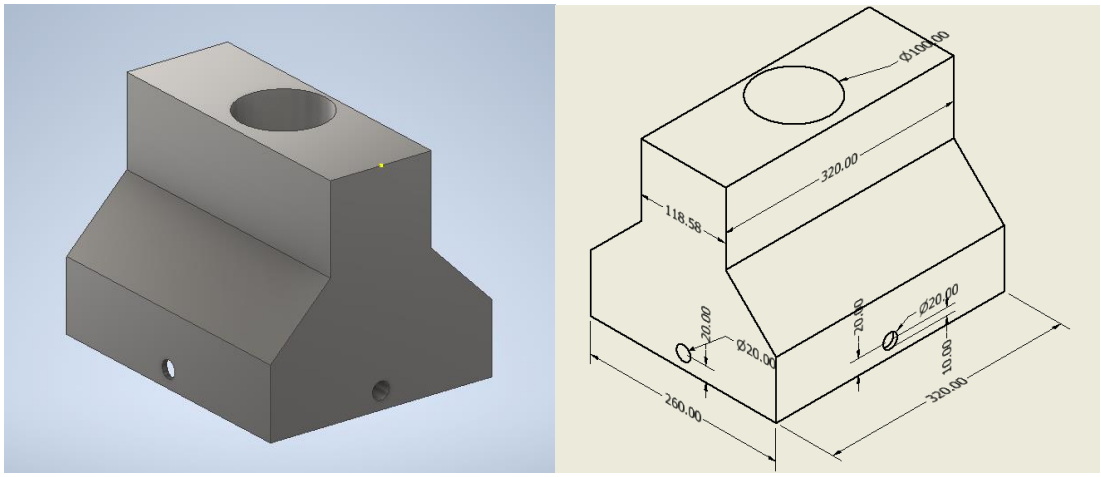


Figura 56: Diseño campana de extracción de gases de combustión equipo de calefacción a biogás en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente el quemador del equipo de calefacción en donde se hara el proceso de combustión sera uno de tipo comercial, similar a los que se utilizan en las cocinas convencionales debido a la forma del intercambiador. Generalmente para los calefon convencionales se usan quemadores especiales debido a la geometría del intercambiador pero en este caso debería bastar con un quemador de este estilo ya que no se busca tanta complejidad en el diseño del equipo. Ademas este tipo de quemadores funcionan con una baja presión de gas de alrededor de 25 [mbar] que es a la presión que se genera el biogas quepor lo que no hace necesario tener un compresor para aumentar la presión del gas reduciendo los costos del equipo.

El quemador a su vez debe estar conectado a su respectiva tubería de alimentación con un regulador de gas para permitir el paso o cierre cuando se requiera.

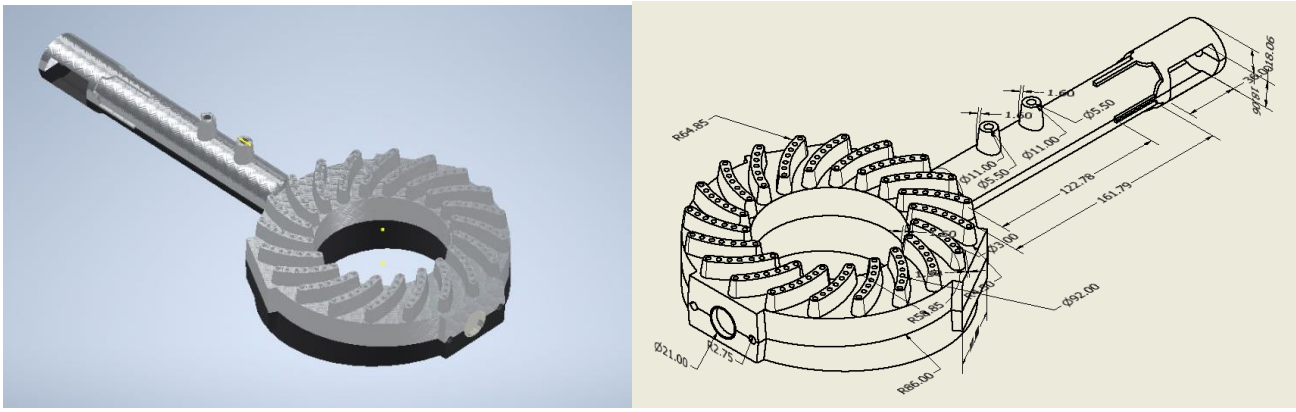


Figura 57: Diseño quemador de biogás de equipo de calefacción en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia.

Otra opción posible es utilizar un calefon convencional y adaptarlo a este sistema. Pero debido a que no se encontro información de si es viable realizar esta acción se dejara como alternativa opcional.

A contuacion se detalla la tabla de costos de cada uno de los componentes de el equipo.

Elemento	Cantidad	Costo
Láminas de Cobre	2	$ 20.000 CLP
Fibras de Aluminio	2	$ 30.000 CLP
Quemador Comercial	1	$ 15.800 CLP
Plancha de Aluminio	1	$60.000 CLP
Total		$125.800 CLP

Figura 58: Costos del equipo de calefacción a biogás.

6.4.2.2. Subsistema de Agitación

En la sección de investigación anterior se menciono la importancia que tiene una correcta agitación en el proceso de digestión anaerobia, en conjunto con diferentes pruebas y escenarios posibles de agitación dependiendo de las condiciones de funcionamiento del sistema. Por lo tanto podemos rescatar los siguientes beneficios de una instalación de un metodo de agitación.

- Mezcla de la biomasa fresca con la biomasa digerida existente al interior del digestor
- Mejor distribución, mezcla de nutrientes y calor dentro del digestor
- Reduce la formación de costras, sedimentos y flóculos de biomasa que pueden sedimentarse en el fondo del digestor
- Mejoran y facilitan la extracción de biogás liberando las burbujas de biogás.
- Mayor producción de biogás

Por lo que de acuerdo con lo anterior se tomó la decisión de plantear un diseño de un agitador de tipo horizontal debido a las características del prototipo y la disposición de este en el lugar de operación.

Existen diversos tipos de agitadores que se dividen según su flujo (radial, axial o tangencial) y que a la vez se subdividen en el tipo de agitador (helice, turbina, palas). En este caso dado el contexto de aplicación se opto por diseñar un agitador de palas con un flujo radial, el cual es el mas utilizado en los tanques que trabajan con residuos biologicos debido a su alto nivel de homogenización y correcta transmisión del calor entre el tanque y los residuos.

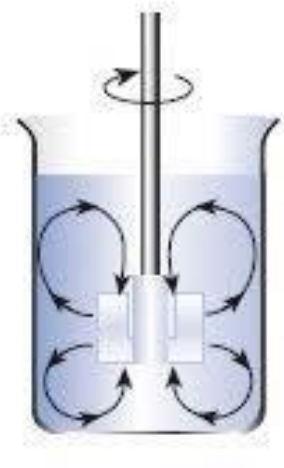
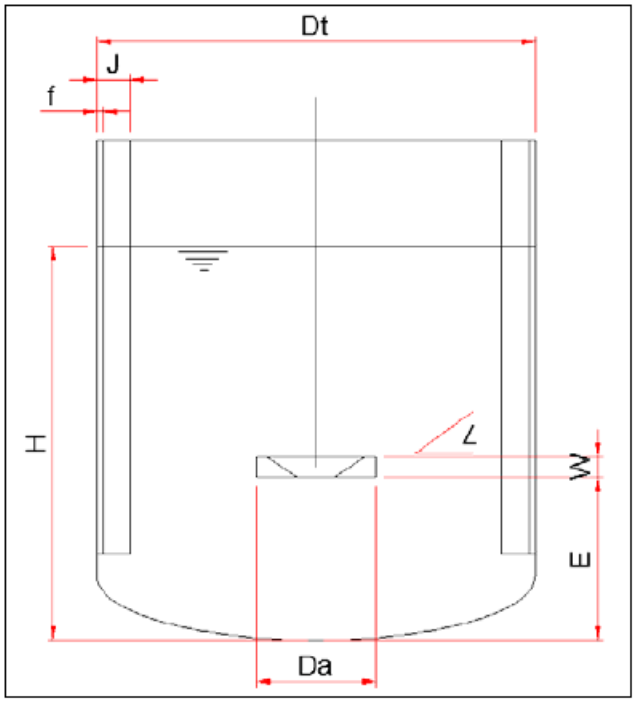


Figura 59: Agitador comercial de palas horizontal (izquierda) y representación de flujo radial (derecha).

Un sistema de agitación consiste de 3 elementos principales, un agitador, y un eje rotatorio y un motor electrico que entregue el torque necesario para hacer girar los dos elementos anteriores.

Para el primer elemento que es al agitador, su dimensionamiento se realizo mediante un diagrama ya estándar para los agitadores de tipo helicé, el cual toma en cuenta diversas medidas y parametros de funcionamiento del estanque o recipiende donde este vaya a funcionar. En la Figura 60 se detalla todas las medidas escenciales de un estanque en donde usualmente opera este tipo de agitadores y como se puede apreciar el diametro de este esta directamente relacionado con las dimensiones del biodigestor en este caso por lo que se puede obtener el diametro final del agitador mediante la expresion que se señala en la derecha.



H / Dt=1	Da / Dt=0.33	E / Dt=0.33
< = 25°	J / Dt=0.1	f/ J=0.02

Figura 60: Representación dimensiones agitador y estanque (izquierda) y relaciones de cálculo (derecha). Fuente: (Castillo, 2013)

Al aplicar la expresión da como resultado un agitador de diametro 115 [mm] el cual debe estar diseñado de acero inoxidable debido a que los residuos al interior del reactor puden ser bastante corrosivos.

Luego para elegir el motor electrico que se debe encontrar la potencia que tendra el agitador. Para encontrar la potencia existen varios metodos y expresiones, pero la que se aplicara en este caso es la siguiente.

$$\boldsymbol{P = KL \times N^2 \times d^3 \times \mu} \qquad \textbf{(3)}$$

En donde N es la velocidad angular de giro del agitador, d es el diametro, **μ** es la viscocidad y KL es una constante caracteristica del tipo de agitador y el numero de palas que este posee. Cabe mencionar si que esta expresión de potencia solo es valida cuando se esta en frente de un fluido con un Reynolds menor a 300, por lo que en este caso es valida ya que el valor del numero de Reynolds es bastante pequeño, inferior a 10 **(Castillo, 2013)**.

Entonces para obtener la potencia del agitador, se necesitan los valores correspondientes dados anteriormente. La velocidad angular del agitador se establecio de 120 [rpm], ya que los sistemas sanitarios tienen un alto valor de viscocidad debido a los diferestes compuestos biologicos con los que puede operar. Para una optima homogenización por lo tanto es necesaria una baja velocidad de rotación, ademas que el agitador en cuestión funciona en un rango de 50 a 150 [rpm]. Luego el valor del diametro es 115 [mm] obtenido en el calculo anterior y el valor de la viscocidad de las heces es de 350 [kg/m*s] a una temperatura de 30°C **(Woolley et al., 2014)**. Finalmente el valor de la constante KL se obtiene tambien de tabla considerando un agitador de 3 palas estándar, el cual es de 43.5 **(Castillo, 2013)**. Resolviendo la expresión se obtiene.

$$\boldsymbol{P = 43,5 \times 2^2\ [rps] \times 0.115^3 [m] \times 350\ [\frac{kg}{m*s}]} \qquad \textbf{(4)}$$

$$\boldsymbol{P = 92.621\ [Watts] \approx 93\ [Watts] \approx 0.125\ [Hp]} \qquad \textbf{(5)}$$

Por ultimo el tercer componente es el eje rotatorio que se encargara de transmitir el movimiento al agitador. El valor escencial para el diseño del eje es el daimetro y para encontrar este es necesaria la siguiente expresión.

$$\boldsymbol{d = \left(\frac{16N_f}{\pi S_y}\left\{\left[4{M_f}^2 + 3{M_t}^2\right]^{\frac{1}{2}}\right\}\right)^{\frac{1}{3}}} \qquad \textbf{(6)}$$

En donde:

d = diametro eje, [mm]

Nf = factor de seguridad, [-]

Mf = momento flector, [N*m]

Mt = momento torsor, [N*m]

Sy = esfuerzo de fluencia acero inoxidable, [MPa]

El momento flector en este caso minimo, debido a que en el eje mascizo de un agitador de estas caracteristicas la carga axial es ligera o nula. Por lo tanto se puede descartar ya que el predominante es el momento torsor. Para calcular el torque es necesaria la siguiente expresión.

$$\boldsymbol{Torque} = \frac{\mathbf{7162} \times \boldsymbol{P}\ [\boldsymbol{Hp}]}{\boldsymbol{rpm}} = \frac{\mathbf{7162} \times \mathbf{0.125}\ [\boldsymbol{Hp}]}{\mathbf{120}} = \mathbf{7.5}\ [\boldsymbol{N} * \boldsymbol{m}] \qquad \textbf{(7)}$$

Luego obtenido el torque se procede a reemplazar los valores en la expresión del diametro, considerando tambien que el esfuerzo de fluencia del acero inoxidable es de 51 [MPa] en este escenario y utilizando un factor de seguridad igual a 3.

$$\boldsymbol{d} = \left(\frac{\mathbf{16} * \mathbf{3}}{\boldsymbol{\pi} * \mathbf{51} * \mathbf{10^6}} \left\{ [\mathbf{3} * \mathbf{7.5^2}]^{\frac{1}{2}} \right\}\right)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{15.7}\ [\boldsymbol{mm}] \qquad \textbf{(8)}$$

Pero el diametro se debe ajustar a un valor estandarizado según tabla, por lo que para este caso se fija en un valor de **20 [mm]**. El largo del eje sera de 1400 [mm], debido a que por condiciones sanitarias y de poscionamiento del baño seco este no debera atravesar completamente el biodigestor. Su fabricación sera de acero galvanizado debido a los altos niveles de corrosión a los que esta expuesto y se podra comprar en el mercado o fabricar directamente a partir de un eje de mayor grosor en caso de que no se encuentre la medida necesaria, mediante el metodo del torneado.

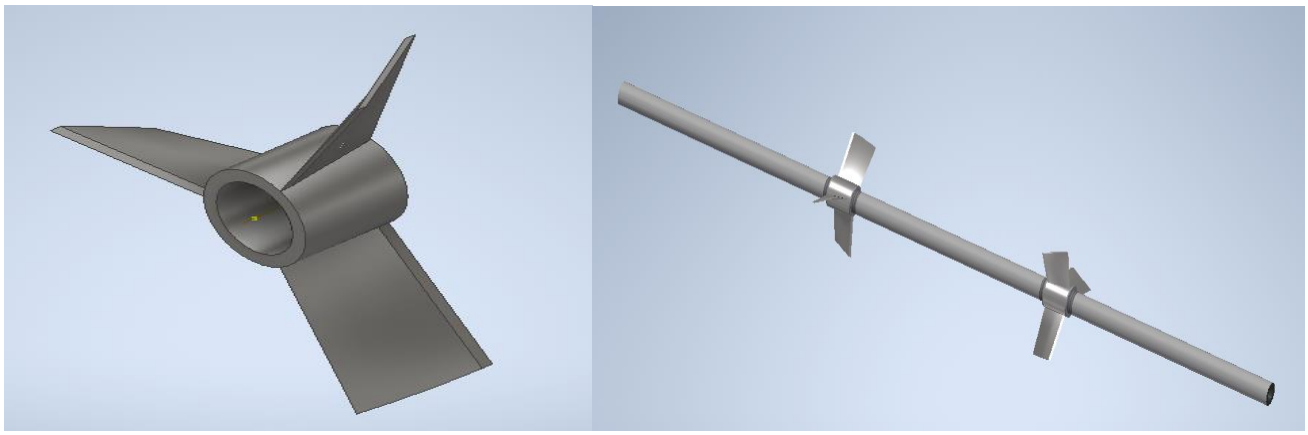


Figura 61: Diseño sistema agitación en Autodesk Inventor. Fuente: Elaboración Propia.

Ahora el ensamble del sub sistema de agitación sera de la siguiente forma y tendra los siguientes componentes secundarios:

- Acople Mecanico: Se encarga de unir el arbol del motor electrico con el eje rotatorio del agitador para asi de esta forma transmitir correctamente el movimiento.
- Rodamiento de bolas: Va adherido a las paredes del biodigestor y cumple tres funciones principales, facilitar el movimiento del eje, resistir las cargas radiales y axiales del conjunto y reducir la fricción del giro.
- Placas protectoras: Son ubicadas a los extremos del rodamiento y consta de una tapa y un anillo unidos por pernos y sus funciones son de evitar el movimiento en dirección axial del rodamiento y a su vez protegerlo antes sustancias corrosivas del ambiente.
- Tapa Biodigestor: Debido que el eje con los agitadores se instalaran al interior del biodigestor de forma horizontal, es necesario para el montaje ingresar este conjunto por alguno de los extremos del bioreactor. Una ve adentro y completamente instalado se debe cerrar el extremo abierto con esta tapa para evitar la salida de cualquier sustancia nociva para la salud humana.
- Sello Mecanico: Similar al sello que poseen las bombas sanitarias, este se instalara entre el contacto de la tapa del reactor y este, para evitar cualquier salida de liquidos o gases altamente peligrosos para el ambiente circundante y las personas que operan el sistema.
- Tuercas Agitador: Los agitadores seran instalados a lo largo del eje a distancias iguales entre ambos, sobre unas leves elevaciones donde se hara un hilo para poder colocar tuercas y restringir la posicion del agitador para mantenerlo fijo y que no vea alterada su posición debido al movimiento giratorio durante el proceso de agitación.

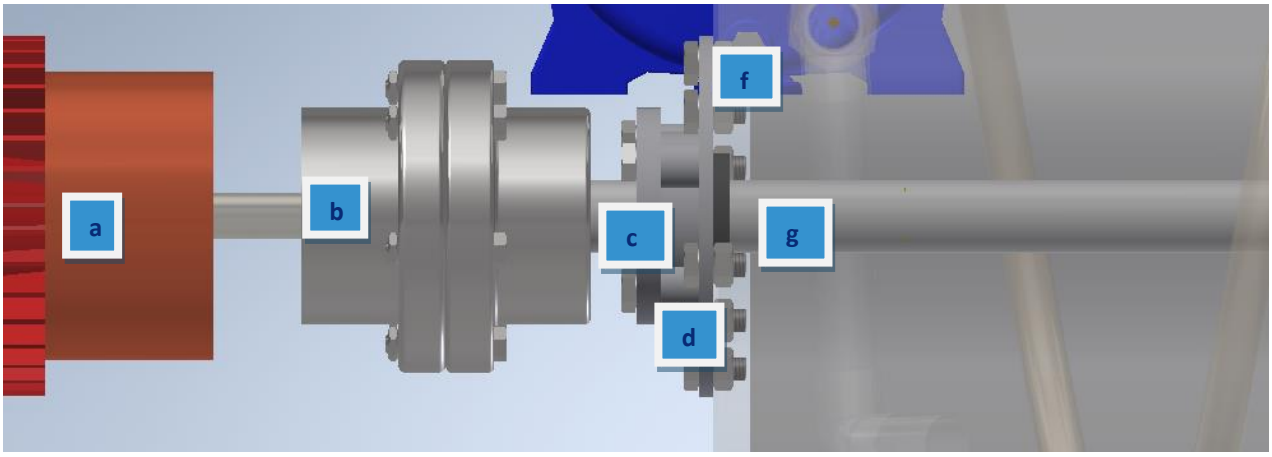


Figura 62: Diseño ensamble sistema agitación en el biodigestor, motor eléctrico (a), acople (b), placas rodamiento (c), rodamiento (d), tapa digestor (f), sello mecánico (g). Fuente: Elaboración Propia

El costo que tienen todos los equipos a nivel comercial son ilustrados en la siguiente tabla.

Elemento	Cantidad	Costo
Agitador	2	$108.000 CLP
Eje Rotatorio	1	$32.490 CLP
Motor eléctrico	1	$35.000 CLP
Acople Mecánico	1	$ 5.000 CLP
Rodamiento de Bolas	1	$ 10.000 CLP
Placas Rodamiento	2	$ 5.000 CLP
Tapa Biodigestor	1	$ 25.000 CLP
Sello Mecánico	1	$ 10.000 CLP
Tuercas Agitador	4	$ 15.000 CLP
Pernos	15	$ 10.000 CLP
Total		$ 255.490 CLP

Tabla 7: Costos sistema de agitación

6.4.2.3. Sub-sistema de Ventilación

La ventilación es un aspecto vital en cualquier sistema sanitario. Como se menciono anteriormente instalar un sistema de ventilación en cualquier espacio que involucre residuos biologicos no solo permite evitar la concentración de malos olores sino tambien la acumulación de insectos o patogenos relacionados a estos. Debido a que la concentración primaria de olores sera al interior del reactor, la unica salida que estos tienen hacia el exterior es mediante el tornillo sin fin que alimenta el biodigestor. Estos olores a su vez pueden acumularse en la cavidad giratoria en donde se depositan las heces para luego traspasarlas al sistema de transporte. Por lo que se determino que la zona critica en donde abundara la mayor concentración de estos sera entre el tornillo y la cavidad.

Como diseño inicial se propone la instalación de un extractor de aire de tipo forzado al interior de la carcasa del inodoro, que ira adherido a la pared de esta mediante pernos. En dicha ubicacón se procedera a hacer una perforación en la carcasa del tamaño del extractor con el fin de colocar una tuberia de salida para los malor olores, la cual dara hacia el tejado de la habitación para poder expulsar de forma correcta cualquier tipo de olor o insecto que pueda ingresar al sistema. Cabe destacar tambien que para que el extractor funcione debera estar conectado a su respectiva fuente de poder que puede ser de la red electrica del hogar o un generador particular.

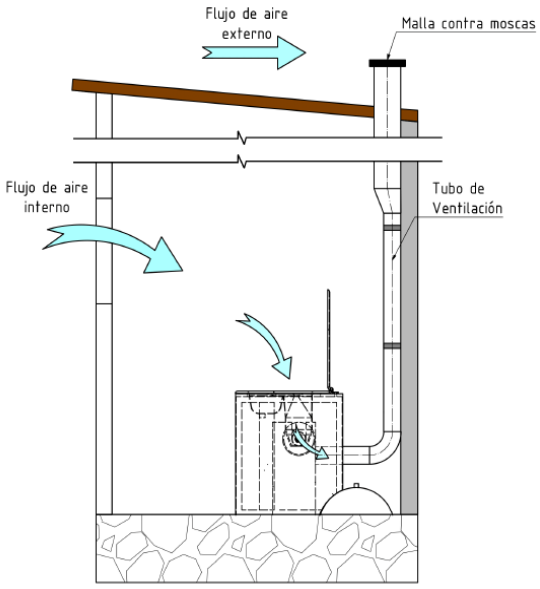


Figura 63: Esquema subsistema Ventilación Fuente: Elaboración Propia

El diseño del extractor en sí no es necesario especificarlo ya que se opto por la opción de adquirirlo directamente desde el mercado. Para esto se decidio elegir un extractor convencional de helice, de flujo axial y manual, esto para ser mas eficiente en cuanto al gasto de energía y solo utilizarlo cuando se le requiera. Este tiene un valor de aproximadamente $ 20.000 CLP en el mercado.

Figura 63: Representación extractor de olores subsistema de ventilación en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia.

6.4.2.4. Subsistema de Tratamiento Secundario.

A partir de los datos que se lograron agrupar se pudo concluir que bajo condiciones mesofilicas la remoción de los patogenos era efectiva pero no lo suficiente para convertir a los residuos en biosolidos reutilizables para uso humano como abono o fertilizante. Es por eso que se decidio la implementación de un proceso secundario de remoción de patogenos. Entre los diversos tipos de metodos se eligio el de compostaje, el cual es el mas utilizado en los sectores rurales y el mas facil y economico de implementar.

El compostaje funciona almacenando los desechos en un recipiente aerobico (compostera), en donde aplicando carbono y temperatura se generan los microorganismos necesarios para eliminar los patogenos y elementos quimicos nocivos restantes del proceso de digestión

anaerobia. Otro metodo aceptable es el del vermicompostaje el cual es basicamente la misma idea del compostaje pero en vez de que los microorganismos hagan todo el trabajo, se utilizan lombrices californianas para eliminar los patogenos restantes en el digestato.

En este caso se plante un diseño bastante simple de una compostera de tres niveles para generar una mayor separación de solidos y liquidos y tamaño de los desperdicios. Este tipo de composteras son generalmente diseñadas de plastico debido a su alta resistencia termica y a la humedad, o de madera que tambien cumple con una buena aislación termica y de humedad al ambiente. La compostera tendra una capacidad de xx y podra ser diseñada manualmente o comprada en el mercado. A continuación se proponen dos equipos, el primero que es posible diseñarlo manualmente mediante planchas de madera o planchas plastico como por ejemplo de polietileno o poliestireno. El planteamiento fue hacerlo de forma rectangular con una tapa adherida por bisagras y agujeros con rejillas a los costados para permitir la entrada suficiente de oxigeno.

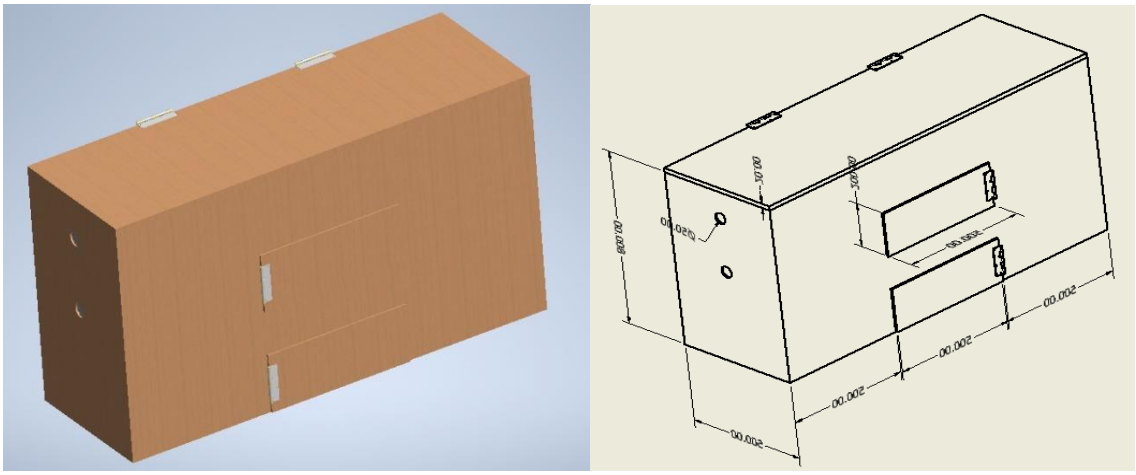


Figura 64: Diseño compostera para subsistema de tratamiento secundario en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia.

El segundo caso corresponde a una compostera comercial giratoria, que consiste en un tambor con aireación en donde se van depositando los desechos para luego mediante el movimiento ir aumentando la velocidad de secado de los residuos. Este equipo ademas cuenta con una tapa que no esta cerrada hermeticamente para poder ingresar los diferentes compuestos necesarios para llevar a cabo el compostaje, como carbono, residuos organicos (hojas, cascaras de verduras) y tierra.

Figura 65: Compostera giratoria comercial para heces humanas.

Elemento	Cantidad	Costo
Planchas de Madera	4	$30.000 CLP
Rejillas Metálicas	2	$30.000 CLP
Bisagras	2	$ 4.000 CLP
Compostera Comercial (opcional)	1	$ 75.000 CLP
Bomba Sanitaria	1	$ 200.000 CLP
Total		$ 264.000 CLP

Tabla 8: Costos subsistema de tratamiento secundario.

6.4.2.5. Piping y Almacenamiento del Biogas

Para poder realizar todas las funciones y desarrollar todos los sub-sistemas y equipos anteriormente mencionados es necesario conectar todos los procesos mediante un sistema de tuberias y ductos que permitan el paso de los diferentes fluidos en cuestión. En este caso se va a trabajar con 3 tipos de fluidos, aire, metano y agua.

Las tuberias de aire son las que estaran en contacto con el exterior, estas corresponden a dos las cuales se ubican en el subsistema de calefacción y en el subsistema de ventilación. En el caso del primero el ducto principal es el que conduce los gases de escape hacia el exterior de la habitación, este ducto suele ir diseñado de acero galvanizado debido a que los gases escapan a altas temperaturas y ademas el dioxido de carbono puede ocasionar oxidación en el ducto, por lo que este material es bastante resistente a este tipo de condiciones. Este ducto puede ir soldado o adherido a la carcasa del subsistema mediante algun tipo de adhesivo para este tipo de acero. El siguiente ducto es el que se encarga de expulsar los malos olores del inodoro. Este al no funcionar bajo condiciones adversas no es necesario que sea de algun material con caracteristicas muy especificas, por lo que puede ser diseñado de algun polimero como el pvc o polietileno. Que ademas cumplen con ser bastante resistentes a la humedad circundante del ambiente.

Luego vienen las tuberias que transportan agua para el subsistema de calefacción. En este caso se tienen dos tipos de materiales según el caso. En el primer caso que corresponde a las tuberias que llevan agua fría y caliente por el sistema, es decir las que salen del colector solar y van en dirección del quemador de biogas. Las tuberias al lelvar agua caliente principalmente deben ser de un material con baja conductividad termica para de esta forma disminuir las perdidas por conducción y convección con el entorno. Para ello se plantea diseñarlas de polietileno que cumplen con lo anterior ademas de ser de bajo costo y faciles de instalar. El diametro de estas tuberias sera de 20 [mm]. En el segundo caso estan los ductos que se encargan de transmitir la energía del agua hacia las paredes del reactor para mantener el interior de este a una temperatura lo mas constante posible. Estas tuberias seran diseñadas de cobre debido a su alta conductividad termica y gran traspaso de energía hacia el biodigestor y tendran un largo aproximado de 8 metros y diametro 20 [mm].

Finalmente estan las tuberias que transportaran el biogas desde el biodigestor hasta el quemador y el tanque de acumulación. Las tubeberias que transportan este tipo de sustancias inflamables son diseñadas generalmente de acero galvanizado o cobre, pero tambien existe la posibilidad de usar tuberias de polietileno para el transporte de este combustible. Este tipo de tuberias tiene muchas ventajas en comparación a las anteriores como por ejemplo gran resistencia a la corrosión, mas economicas y faciles de instalar, uniones mas seguras, adaptables a diferentes tipos de terreno y resistente a las altas temperaturas. El unico pero que existe es que todos los elementos secundarios en el piping que seran mencionados mas adelante son de carácter metalico por lo que quizas sea mas dificil poder unirlos a las tuberias de polietileno y se deba utiliziar diferentes tipos de conexiones extras.

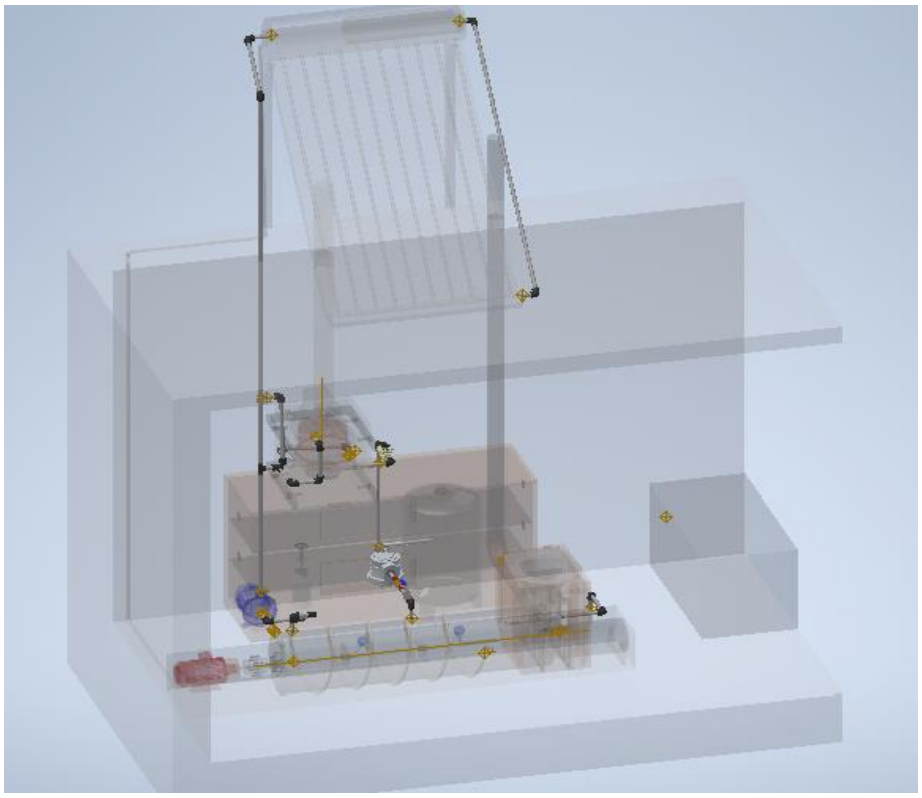


Figura 66: Esquema de Piping en sistema de generación en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración propia.

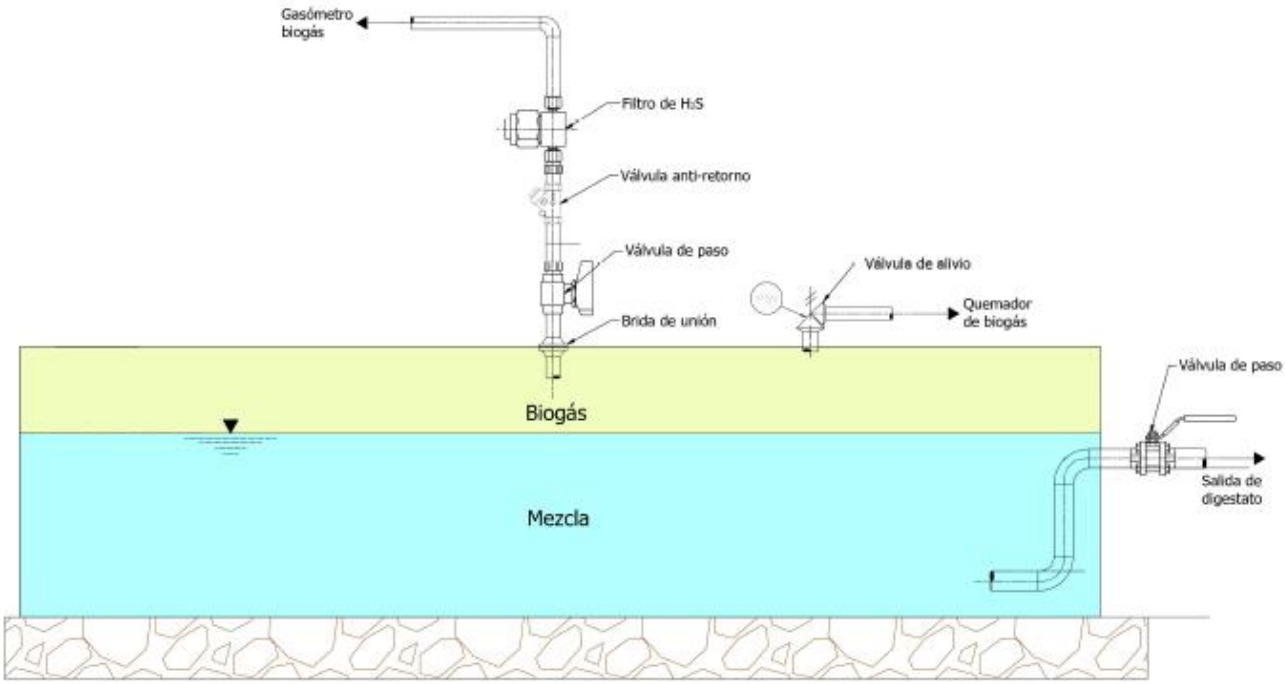


Figura 67: Esquema de Piping para transporte de biogás. Fuente: Elaboración Propia

El almacenamiento del biogas es escencial para luego utilizarlo en las diferentes aplicaciones del hogar. Para esto existen diversos tipos de almacenamiento y opciones disponibles. Dado que el biogas que se produce sale a baja presión, entre los 7 y 20 [mbar], es necesario contar con un tanque que pueda ser capaz de mantener estos parametros de funcionamiento. Para ello se propone utilizar un tanque hidroneumatico el cual puede regular la presion mediante la extracción de aire. Un tanque hidroneumático contiene aire y agua bajo presión. No tiene vejiga y el aire tiene contacto directo con el biogás. El aire comprimido sirve como un cojín para ejercitar o absorber presión. Este tipo de tanque es utilizado principalmente en instalaciones con agua, pero en este caso se puede modificar para trabajar con metano. Es una opción económica, fácil de instalar y usar, además que se encuentra a la venta en el mercado. El volumen considerado para este tanque es de 100 [L].

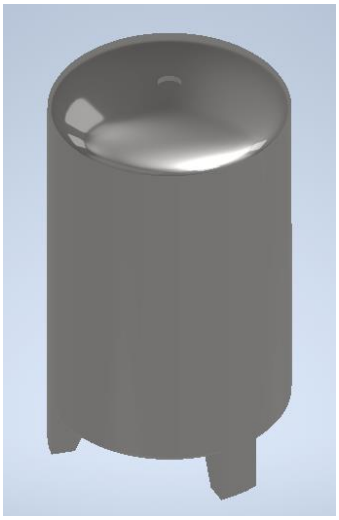


Figura 68: Representación de estanque acumulador de biogás en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración Propia.

. Existen estanques de acumulación que cumplen esta función, pero de dimensiones industriales, lo que para este proyecto de tipo domiciliario es de carácter inviable. Otra opción que se propone es la de utilizar un estanque estándar de plástico o metal y adaptarlo para que pueda igualar a la presión de salida del biogás y así permitir el ingreso de este. Para esto se plantea diseñar un tipo de contrapeso, similar a un pistón al interior del estanque estándar que puede generar esta presión sobre el biogás y así permitir su llenado de forma simple y rápida.

Se muestra el costo aproximado de cada uno de los componentes y equipos a utilizar.

Elemento	Cantidad	Costo
Tuberías de polietileno	1 (rollo 100 m)	$ 35.000
Tanque de Acumulación	1	$ 120.000
Filtro Biogás	1	$ 25.000 CLP
Trampa de Vapor	1	$ 5.000 CLP
Válvula de Paso	1	$ 5.000 CLP
Válvula Antirretorno	1	$ 5.000 CLP
Gasómetro	1	-
Medidor de pH	1	$ 30.000 CLP
Válvula de Muestreo	1	$ 25.000 CLP
Total		$ 250.000 CLP

Tabla 9: Costos de Piping y acumulación del biogás.

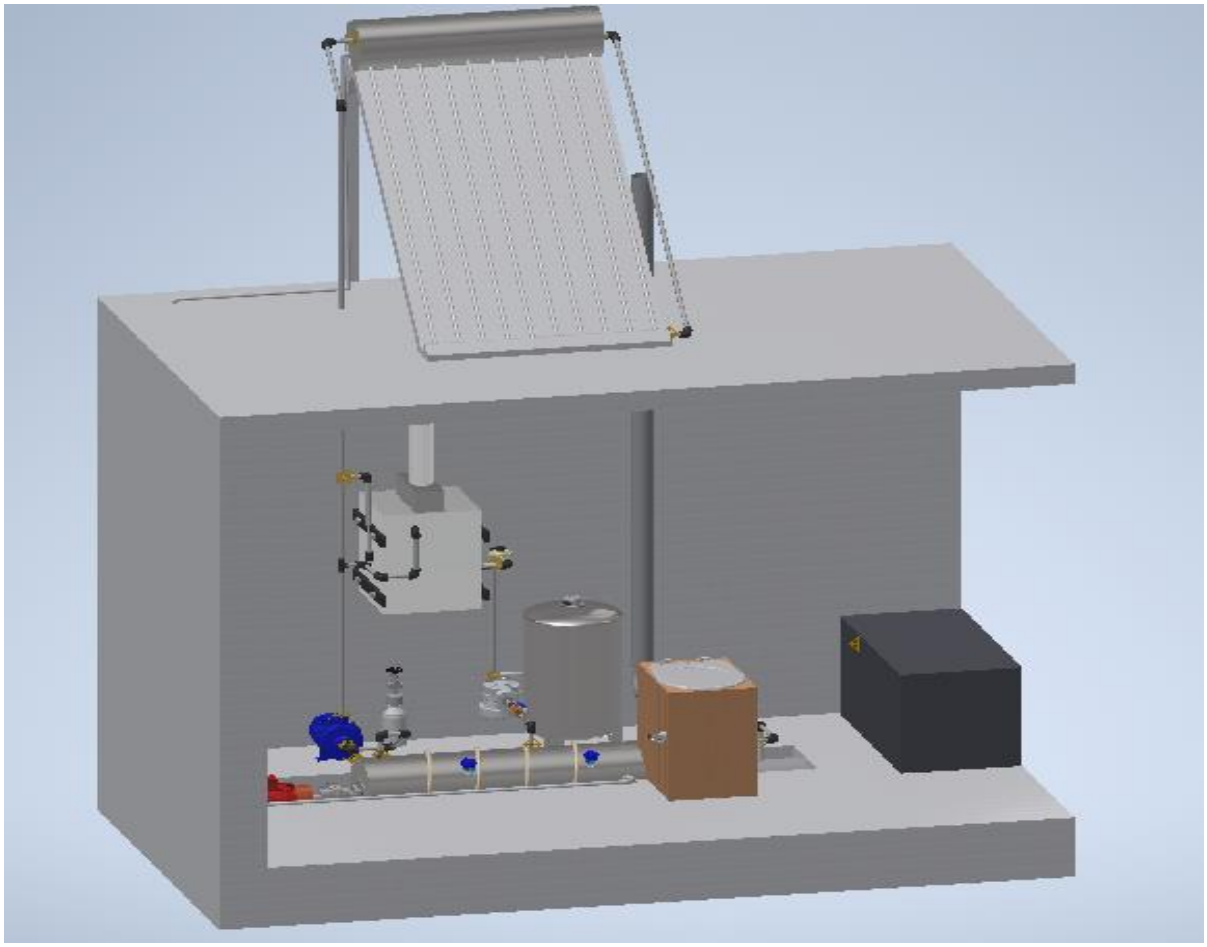
6.4.2.6. Aspectos Económicos

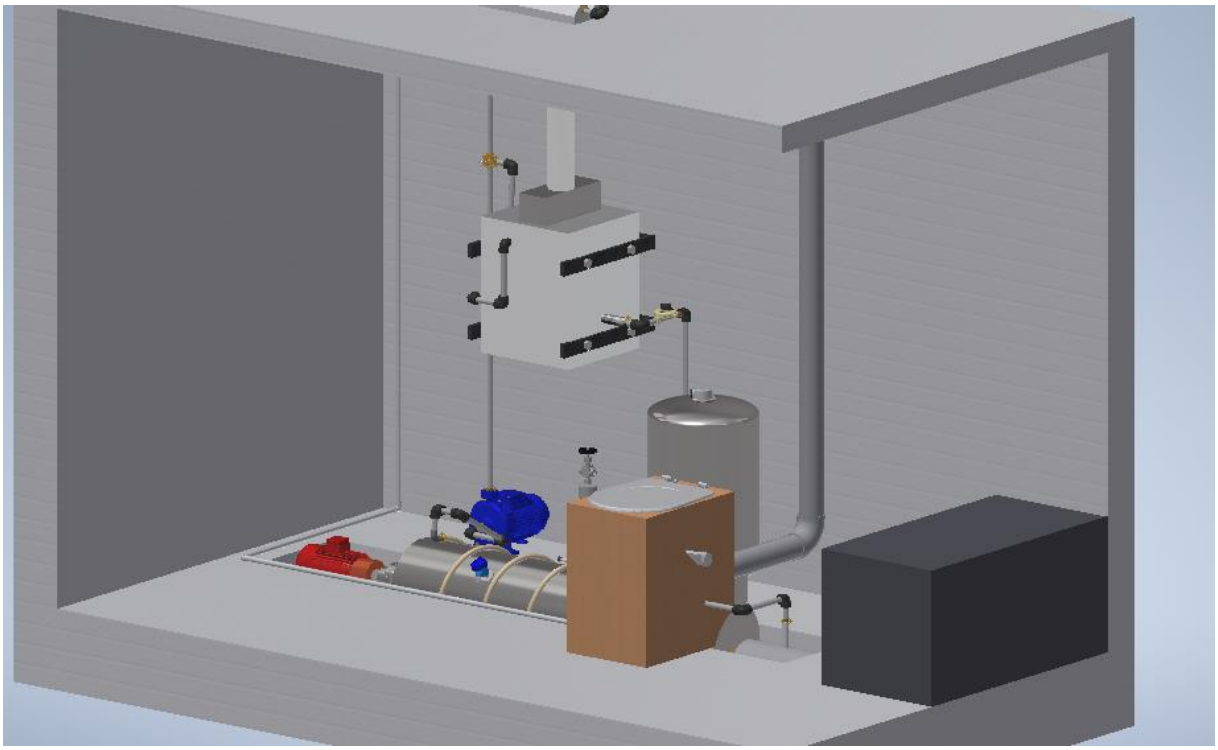
Debido a que este diseño esta planteado desde un punto teoríco y con un enfoque experimental se decidio por reducir lo mejor posible el costo de fabricación ya que aunque esta enfocado para zonas vulnerables o de menos recursos, es necesario primero desarrollar un presupuesto experimental inicial para una vez fabricado y evaluado su funcionamiento poder concluir que gastos reducir o agregar de acuerdo a su rendimiento en las diferentes condiciones de operación.

Para el diseño del primer prototipo se considero un presupuesto de $329.000 CLP para todos los equipos y materiales a fabricar. Este fue considerando todas las funciones anteriormente planteadas. Ahora con los subsistemas incluidos se tiene el siguiente nuevo presupuesto.

Subsistema	Costo (sin mano de obra)
Prototipo Inicial	$ 329.000 CLP
Calefacción	$ 303.384 CLP
Agitación	$ 255.490 CLP
Ventilación	$ 20.000 CLP
Piping	$ 130.000 CLP
Acumulación	$ 120.000 CLP
Tratamiento Secundario	$ 264.000 CLP
Sistema Completo	$ 1.422.874 CLP

Tabla 10: Presupuesto total para el diseño e implementación del sistema de generación.





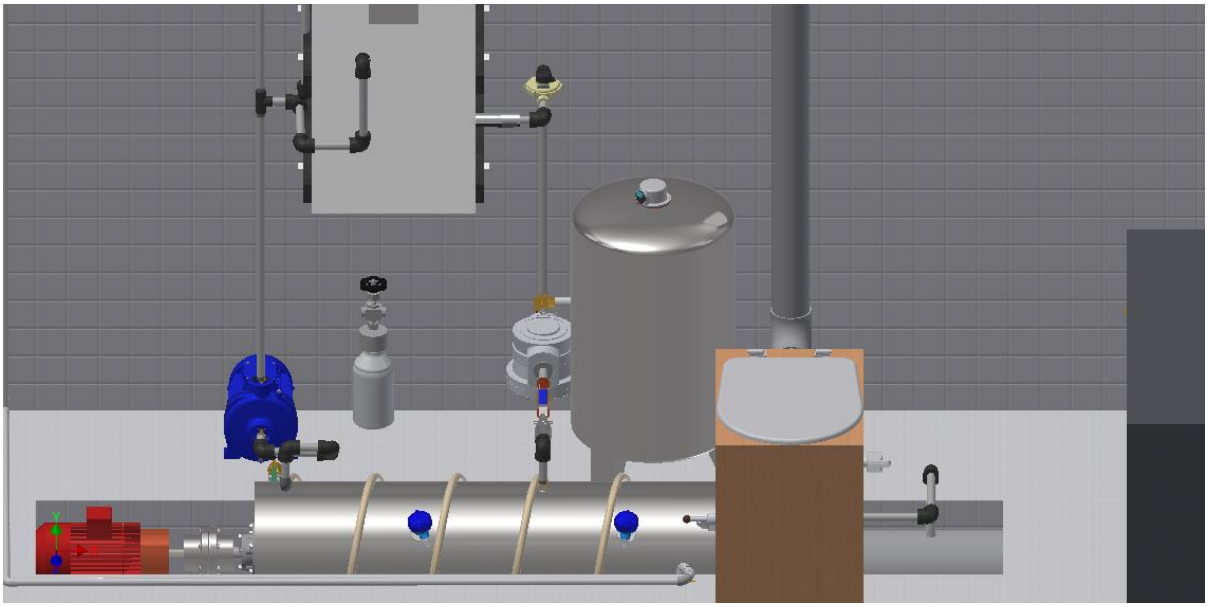


Figura 69: Esquema, ensamble y distribución de equipos y componentes del sistema de generación en Autodesk Inventor 2020. Fuente: Elaboración propia

6.5. Etapa 5: Desarrollo

6.5.1. Modelo de Simulación

Para poder realizar las simulaciones que puedan entregarnos una estimación aproximada del comportamiento de los procesos anaerobios y estimar una producción de biogas, se utilizo el modelo “Anaerobic Co-digestión Model”, AcoD, el cual esta basado en el modelo ADM1 o “Anaerobic Digestion Model 1” que modela los 5 pasos fundamentales de la digestión anaerobia: desintegración, hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis, mencionados en el merco teoríco. Los pasos de solubilización extracelular se dividen en desintegración e hidrólisis; el primero consiste en un paso no biológico, donde la materia orgánica e inorgánica es convertida a material particular inerte, carbohidratos, proteínas y lípidos. El segundo es una hidrólisis enzimática en la que ocurren tres procesos en paralelo, convirtiendo carbohidratos, proteínas y lípidos en monosacáridos (MS) aminoácidos (AA) y ácidos grasos de cadena larga (AGCL) respectivamente. Tanto la desintegración como la hidrólisis son procesos que se representan con una cinética de primer orden **(Batstone et al., 2002).**

Dos grupos de bacterias acidogénicas degradan los monosacáridos y aminoácidos en una mezcla de ácidos orgánicos, hidrógeno y dióxido de carbono. Los ácidos orgánicos son consecuentemente convertidos a acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, por bacterias acetogénicas que utilizan los ácidos grasos de cadena larga propionato (HPr), butirato (HBu) y valerato (HVa). En el último paso, el hidrógeno y el acetato son convertidos en una mezcla de metano y dióxido de carbono. El hidrógeno producido es convertido por bacterias metanogénicas hidrogenotrópicas y el acetato por bacterias metanogénicas acetoclásticas. En estos pasos intracelulares bioquímicos, se utiliza una cinética tipo Monod (9) que describe el consumo de cada sustrato. La muerte celular es representada en una cinética de primer orden, la cual es recirculada dentro del modelo. De igual forma, se incluyen inhibiciones de pH (en todos los grupos bacterianos) inhibiciones por hidrógeno, especialmente a los grupos acetogénicos, e inhibiciones de amonio libre para la metanogénesis acetoclástica. La inhibición de pH es representada por ecuaciones empíricas (10) mientras las inhibiciones por hidrógeno y amonio libre por funciones no competitivas (11).

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_s + S} X \qquad (9)$$

$$I = \frac{1 + 2{,}10^{0{,}5[pH_{LL} - pH_{UL}]}}{1 + 10^{[pH - pH_{UL}]} + 10^{[pH_{LL} - pH]}} \qquad (10)$$

$$I = \frac{1}{1 + S_1 / K_1} \qquad (11)$$

Donde:

I: Proceso de Inhibición (d-1)

Ks : Constante de saturación media (Kg DQO/m3)

KI : Constante de Inhibición (Kg DQO/m3)

S: Concentración del Sustrato (Kg DQO/m3)

μ_max: Constante de rata máxima de crecimiento de Monod (d-1)

pH: Valor de pH medido

pHUL: Valor de pH Alto de inhibición

pHLL Valor de pH bajo de inhibición

Para implementar el ADM1 de forma apropiada en esta simulación de codigestión anaeróbica se llevaron a cabo las siguientes modificaciones al modelo original mencionado anteriormente:

1. Todos los substratos de carácter complejo incluidos en el modelo fueron definidos por su contenido en proteínas, lípidos, carbohidratos y fracción refractaria determinada mediante ensayos experimentales tipo batch.

2. Diferentes estados adicionales y reacciones de fermentación fueron adheridas para los diferentes substratos fermentables que no se pudieron encontrar en los estados existentes del modelo original.

3. Nuevos estados inertes se incluyeron en el modelo para poder considerar las fracciones no biodegradables de los substratos más complejos, como por ejemplo las

heces humanas que tienen un alto contenido de hormonas y antibióticos.

4. Se creo un nuevo estado para la biomasa muerta, X_d, que eventualmente pueda hidrolizar en azucares, aminoácidos, ácidos grasos y solubles inertes en donde su producción de biomasa muerta está considerada en el modelo ADM1 para la desintegración de compuestos particulares X_c.

5. Todos los estados variables y parámetros del modelo ADM1 son expresados en base molar para evitar inconsistencias en los balances masicos de las diferentes especies orgánicas e inorgánicas.

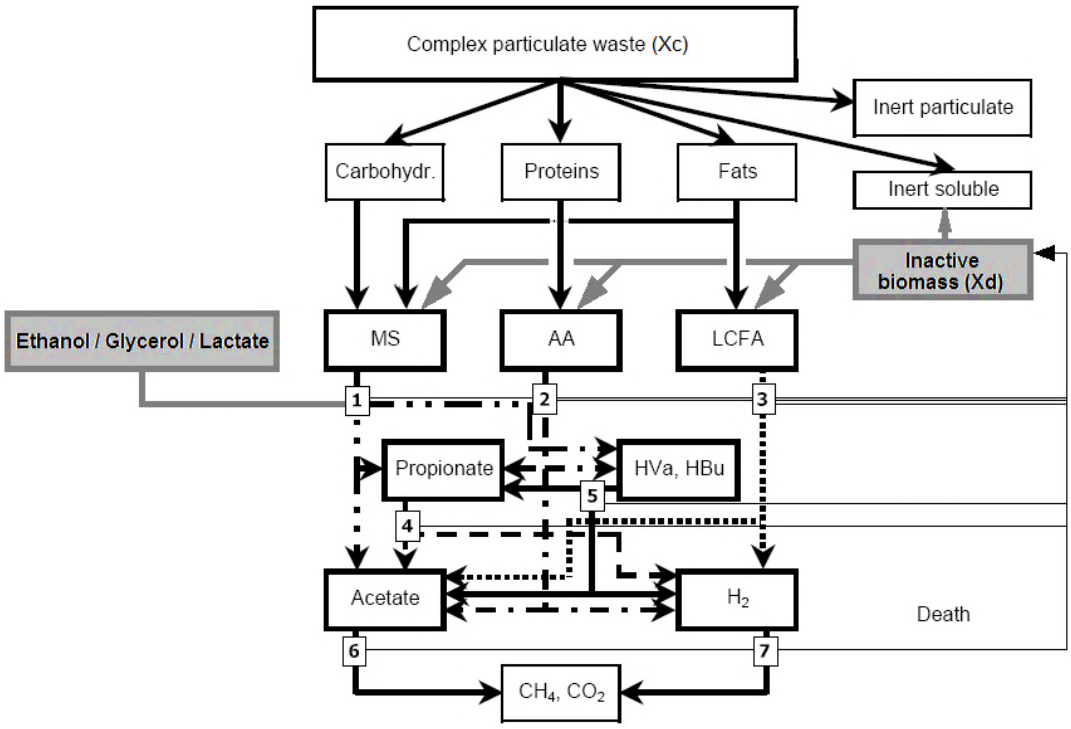


Figura 70: El modelo anaeróbico tal como se implementa incluyendo procesos bioquímicos (1) acidogénesis de azúcares (monosacárido, MS), etanol, glicerol y lactato, (2) acidogénesis de aminoácidos (AA), (3) acetogénesis de LCFA, (4) acetogénesis de propionato, (5) acetogénesis de butirato y valerato, (6) aceticlástico metanogénesis, y (7) metanogénesis hidrogenotrófica. Fuente: (García-Gen et al., 2013)

El modelo AcoD basado en el ADM1 integra el etanol, glicerol y fermentación lactica implementada a traves de reacciones equivalentes de glucosa. Las estequiometrias de estas nuevas reacciones fueron derivadas de la estequimoetría de la fermentación de la glucosa siguiente los metodos generales. Junto con esto ningun otro rendimiento catabolico se necesito como coeficiente estequiometrico para asi evitar la cantidad de parametros involucrados en las reacciones y asi disminuir la complejidad del modelo. Solo las producciones estandard del modelo ADM1 de glucosa se utilizaron para caclular la estequiometria de las nuevas reacciones. Los oxidantes de azucares, originalmente definidos en el modelo ADM1 fueron redefinidos como fermentadores responsables de la fermentación del etanol, glicerol, lactatos y azucares. De esta forma el consumo de ratios kineticos incorporan un aspecto competitivo para los multiples substratos fermentados. Junto con esto no se adicionaron nuevos grupos microbianos al modelo.

Ahora para la etapa de acidogenesis que es la que ocurre a mayor velocidad, no es necesaria una descripción tan especifica de la estequiometria en la fermentación de los substratos solubles en productos de acidos grasos volátiles ya que estos son rapidamente convertidos en acetato, hidrógeno y CO2 en las etapas metanogénicas. En estas etapas los balances de masas y electrones son los elementos primordiales que deben estar descritos de manera eficiente y precisa. En muchos casos el impacto que tiene hacer esta simplificación en la predicciopn del efluente del COD y el flujo de gas es casi nulo, mientras no ocurra una inhibición considerable en la metanogenésis. **(Rodríguez et al., 2006).**

Bajo estas premisas, los coeficientes estequimetricos catabolicos del modelo ADM1 *(f)*para la etapa de acidogénesis de cualquier substrato soluble puede ser expresado de forma equivalente en terminos de fermentación de glucosa. Además cada rendimiento catabolico esta en función del rendimiento estándar de fermentación de azucar del modelo ADM1 (X_{su}). Este ultimo es sustituido por un único grupo generico de fermentación de biomasa (X_{fer}) capaz de degradar todos los sustratos solubles. Todo esto se muestra de forma empirica en la tabla xx.

Procedure: 1) find the stoichiometric ratio among soluble compounds and glucose to obtain the catabolic products and yields as glucose equivalents and 2) amend substrate COD with H_2.

ETHANOL

$$C_2H_6O + H_2O \rightarrow \tfrac{1}{3}\, C_6H_{12}O_6 + 2\, H_2$$

$$(C_6H_{12}O_6 \rightarrow fbu_su\ Bu + fpro_su\ Pro + fac_su\ Ac) \cdot \tfrac{1}{3}$$

$$C_2H_6O + H_2O \rightarrow \tfrac{1}{3}\, fbu_su\ Bu + \tfrac{1}{3}\, fpro_su\ Pro + \tfrac{1}{3}\, fac_su\ Ac + 2\, H_2$$

$$C_2H_6O + H_2O \rightarrow fbu_et\ Bu + fpro_et\ Pro + fac_et\ Ac + 2\, H_2$$

GLYCEROL

$$C_3H_8O_3 \rightarrow 0.5\, C_6H_{12}O_6 + H_2$$

$$(C_6H_{12}O_6 \rightarrow fbu_su\ Bu + fpro_su\ Pro + fac_su\ Ac) \cdot 0.5$$

$$C_3H_8O_3 \rightarrow 0.5\, fbu_su\ Bu + 0.5\, fpro_su\ Pro + 0.5\, fac_su\ Ac + H_2$$

$$C_3H_8O_3 \rightarrow fbu_gly\ Bu + fpro_gly\ Pro + fac_gly\ Ac + H_2$$

Figura 71: Cálculos estequiométricos para la implementación generalizada de sustratos fermentables. Ejemplo para etanol, glicerol y ácido láctico. Fuente: (García-Gen et al., 2013)

En primer lugar, se considera la conversión estequiométrica de etanol a glucosa (1:3) y glicerol o ácido láctico a glucosa (1:2); luego, se utiliza la misma reacción metabólica en ADM1 para azúcares (glucosa) para canalizar la fermentación de estos nuevos sustratos y obtener sus correspondientes rendimientos catabólicos de butirato, propionato y acetato. Finalmente, las reacciones de fermentación se modifican con hidrógeno para cumplir con los balances de masa y electrones (DQO). El crecimiento de los fermentadores Xfer varía en función de cuánto de cada sustrato (azúcares, etanol, glicerol o lactato) se degrada ya que los rendimientos de biomasa en cada uno son diferentes. Por lo tanto, los rendimientos de biomasa en etanol, glicerol o lactato (Sin embargo, Ygly, Ylac,) deben calcularse. Kleerebezem y van Loosdrecht (2010) formularon un método generalizado, el método termodinámico equivalente de electrones (TEEM) para estimar el rendimiento de biomasa en cualquier sustrato basado en la disipación termodinámica y energética de Gibbs por mol de biomasa formada. Se recomienda el método TEEM para estimar el rendimiento de biomasa de Xfer en etanol, glicerol y lactato.

Cinética de fermentación: reacciones de absorción de sustratos fermentables Las expresiones

de velocidad de reacción de absorción de sustratos solubles fermentables (12) también se modificaron para tener en cuenta la competencia de los fermentadores genéricos de biomasa, Xfer, para múltiples sustratos. Se debe incorporar un término competitivo (13) a las expresiones de tasa para tener en cuenta la fracción de cada sustrato fermentable en el sistema (análogo a ADM1 para la absorción de ácidos valérico y butírico degradado por el mismo grupo de microorganismos, Xc4).

$$\textbf{Uptake rates:} \quad \rho_j = k_{m,\,i} \cdot \frac{S_j}{K_S + S_j} \cdot X_{fer} \cdot \frac{S_j}{S_j + \sum_{i \neq j} S_i} \cdot I_2 \qquad (12)$$

$$\textbf{Competitive term} = \frac{S_j}{S_j + \sum_{i \neq j} S_i} \qquad (13)$$

donde i, j = azucares, etanol, lactato, etc.

Los valores de los parámetros cinéticos para etanol, tasa de absorción específica máxima de Monod (km,et) y valor de saturación media (Ks,et) se tomaron de Batstone et al. (2004), km_et = 3 [kg DQO/m3] DQO·d y Ks_et = 0,5 [kg DQO/m3], expresados en unidades molares. En el Cuadro 3.3 se muestran todos los procesos considerados en el modelo en los que se resaltan las diferencias con respecto al ADM1 original.

Tabla 11: Procesos bioquímicos y sus expresiones cinéticas consideradas en el modelo. Se destacan los nuevos procesos; el resto permanecen como en ADM1 (la absorción de azúcares no se considera un proceso nuevo, pero se modifica con respecto al ADM1 original). Fuente: (García-Gen et al., 2013)

Process name	Process Rate (mol/L·d)
Disintegration of particulate waste (X_c)	$k_{dis} \cdot X_c$
Hydrolysis of inactive biomass (X_d)	$k_{hyd,_Xd} \cdot X_d$
Hydrolysis of carbohydrates	$k_{hyd,ch} \cdot X_{ch}$

(Continue in next page)

(Continued from last page)

Process name	Process Rate (mol/L·d)
Hydrolysis of proteins	$k_{hyd,pr} \cdot X_{pr}$
Hydrolysis of lipids	$k_{hyd,li} \cdot X_{li}$

Uptake of sugars	$k_{m,su} \cdot \frac{S_{su}}{K_{s_su} + S_{su}} \cdot X_{fer} \cdot \frac{S_{su}}{S_{su} + S_{et} + S_{gly} + S_{lac}} \cdot I_1$
Uptake of ethanol	$k_{m,et} \cdot \frac{S_{et}}{K_{s_et} + S_{et}} \cdot X_{fer} \cdot \frac{S_{et}}{S_{su} + S_{et} + S_{gly} + S_{lac}} \cdot I_1$
Uptake of glycerol	$k_{m,gly} \cdot \frac{S_{gly}}{K_{s_gly} + S_{gly}} \cdot X_{fer} \cdot \frac{S_{gly}}{S_{su} + S_{et} + S_{gly} + S_{lac}} \cdot I_1$
Uptake of lactate	$k_{m,lac} \cdot \frac{S_{lac}}{K_{s_lac} + S_{lac}} \cdot X_{fer} \cdot \frac{S_{lac}}{S_{su} + S_{et} + S_{gly} + S_{lac}} \cdot I_1$
Uptake of amino acids	$k_{m,aa} \cdot \frac{S_{aa}}{K_{s_aa} + S_{aa}} \cdot X_{aa} \cdot I_1$
Uptake of LCFA	$k_{m,fa} \cdot \frac{S_{fa}}{K_{s_fa} + S_{fa}} \cdot X_{fa} \cdot I_2$
Uptake of valerate	$k_{m,c4} \cdot \frac{S_{va}}{K_{s_va} + S_{va}} \cdot X_{c4} \cdot \frac{S_{va}}{S_{bu} + S_{va}} \cdot I_2$
Uptake of butyrate	$k_{m,c4} \cdot \frac{S_{bu}}{K_{s_bu} + S_{bu}} \cdot X_{c4} \cdot \frac{S_{bu}}{S_{bu} + S_{va}} \cdot I_2$
Uptake of propionate	$k_{m,pro} \cdot \frac{S_{pro}}{K_{Spro} + S_{pro}} \cdot X_{pro} \cdot I_2$
Uptake of acetate	$k_{m,ac} \cdot \frac{S_{ac}}{K_{Ssac} + S_{ac}} \cdot X_{ac} \cdot I_3$
Uptake of hydrogen	$k_{m,h2} \cdot \frac{S_{h2}}{K_{s_h2} + S_{h2}} \cdot X_{h2} \cdot I_1$
Decay of X_{fer}	$k_{dec_Xfer} \cdot X_{fer}$
Decay of X_{aa}	$k_{dec_Xaa} \cdot X_{aa}$
Decay of X_{fa}	$k_{dec_Xfa} \cdot X_{fa}$
Decay of X_{c4}	$k_{dec_Xc4} \cdot X_{c4}$
Decay of X_{pro}	$k_{dec_Xpro} \cdot X_{pro}$
Decay of X_{ac}	$k_{dec_Xac} \cdot X_{ac}$
Decay of X_{h2}	$k_{dec_Xh2} \cdot X_{h2}$

Para resumir, el AcoD Model, calcula el volumen de la mezcla y la composición del efluente hacia el digestor. Las ecuaciones diferenciales ordinarias de todos los estados fueron codificadas e implementadas mediante el software Matlab e integradas con el solucionador ODE113 (García-Gen et al., 2013). Además, para la validación de este modelo, las simulaciones fueron realizadas bajo las mismas condiciones de operación que las plantas piloto que tratan tres diferentes substratos para la producción de biogás bajo el régimen mesofílico.

6.5.2. Simulación

Para el caso de la simulación se se tienen los siguientes parametros de composición de la alimentación de las heces humanas.

Tabla 12: Composición y caracterización de las heces humanas.

Parameter	Human Feces
% volume in feed	100
Liquid fraction (%)	85
pH	6.6
Density (kg/L)	1.2
TS (g/L)	20.88
VS (g/L)	12.68
CODt (g/L)	24.6
CODs (g/L)	10.25
TKN (g N/L)	0.12
NH_4^+ (g N/L)	0.504
TA (g $CaCO_3$/L)	0.25
Chloride (g/L)	0.6
Sulphate (g/L)	1.77
Proteins (%)	25
Lipids (%)	15
Carbohydrates (%)	25
Ethanol (g/L)	-
Biodegradability (%)	70

En conjunto con los siguientes parametros de operación del biodigestor.

Tabla 13: Parámetros de simulación y operación de digestor.

Parameter	Value
DQO (g/L)	50.9
CSTR (L)	14
HRT (d)	20
VCO (gDQO/Ld)	2.55
T° (C°)	37
P (atm)	1
T. Simulation (d)	80

Hay que recordar también que el 95% del valor de estado estacionario se alcanza a 3*TRH. En este caso, se alcanza el estado estacionario desde el principio, ya que se corrió dos simulaciones. Una primera simulación hasta alcanzar el estado estacionario. y una segunda para utilizar las condiciones iniciales del interior del reactor con los datos del último instante de la primera simulación para iniciar la simulación de 80 días.

6.5.3. Resultados.

En total luego de 1 mes que corresponde aproximadamente al TRH se logro captar una producción de 300 litros de biogas para el digestor en cuestión y 700 litros para el total de la simulación (80 días). Con las siguientes caracteristicas entregadas en los graficos que se muestran a continuación.

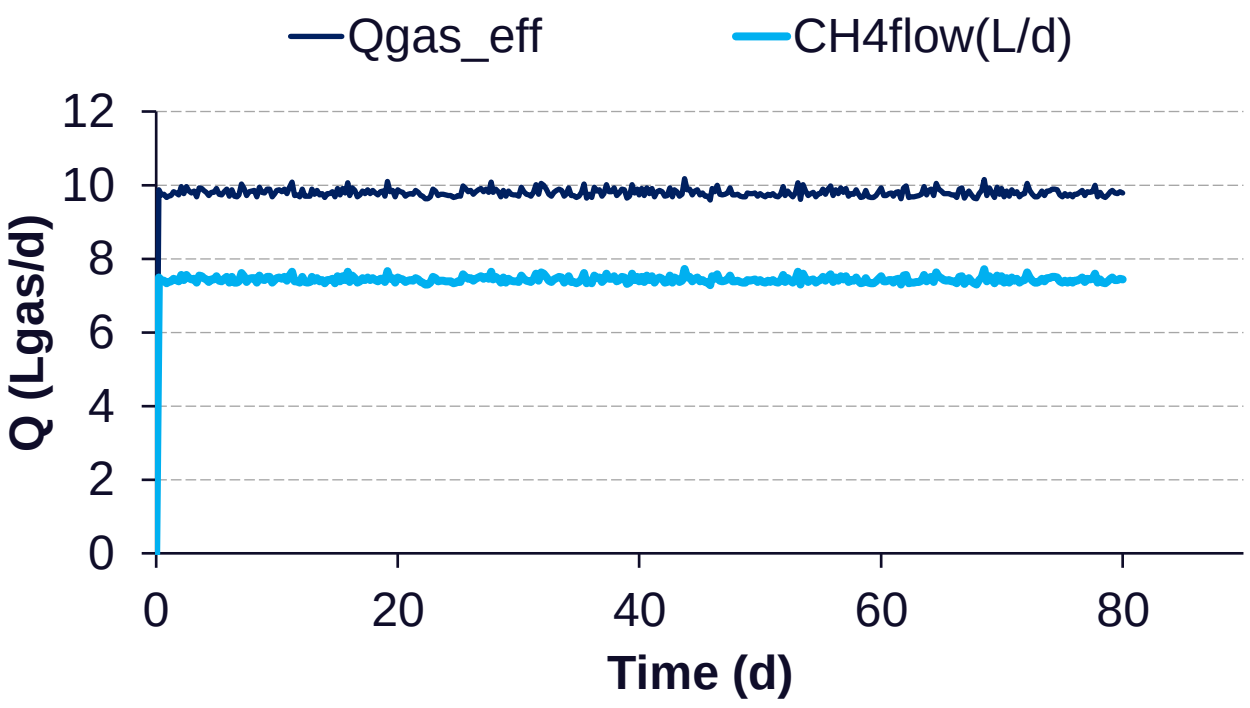


Figura 72: Flujo de biogás diaria vs tiempo (días).

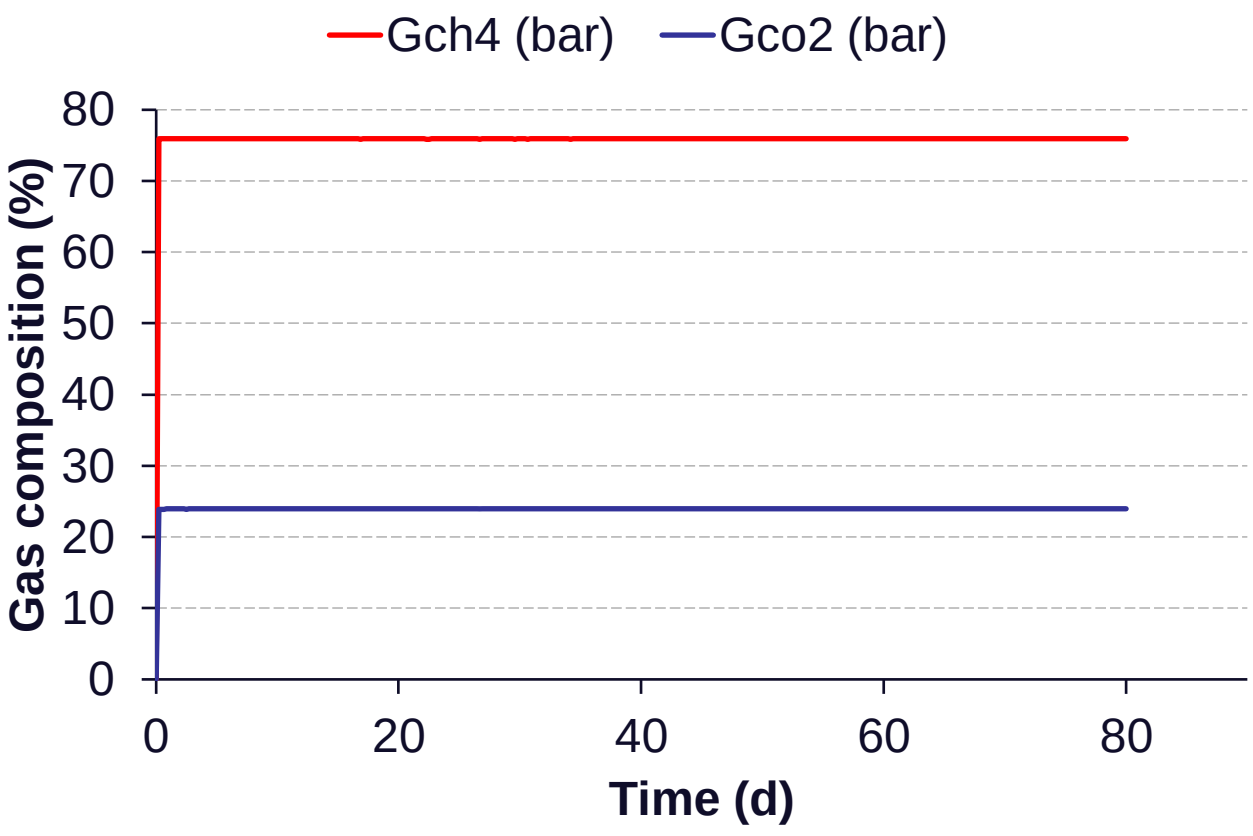


Figura 73: Composición del biogás producido vs tiempo (días).

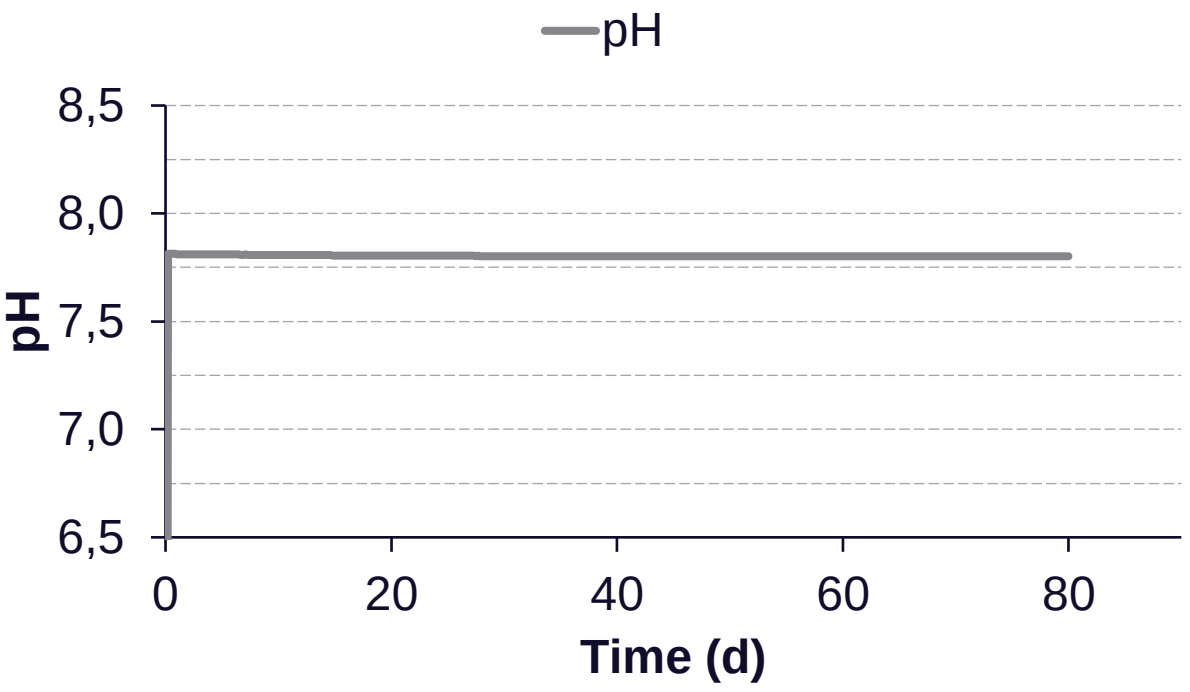


Figura 74: Grafico de variación de pH vs tiempo (días).

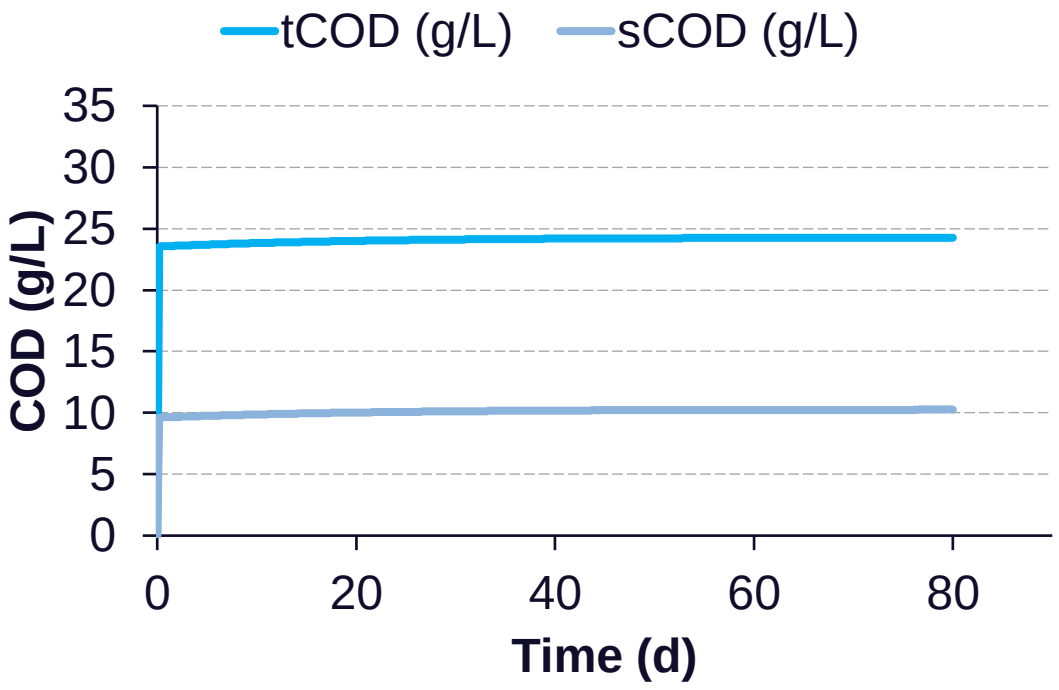


Figura 75: Grafico de remoción de COD vs tiempo (días).

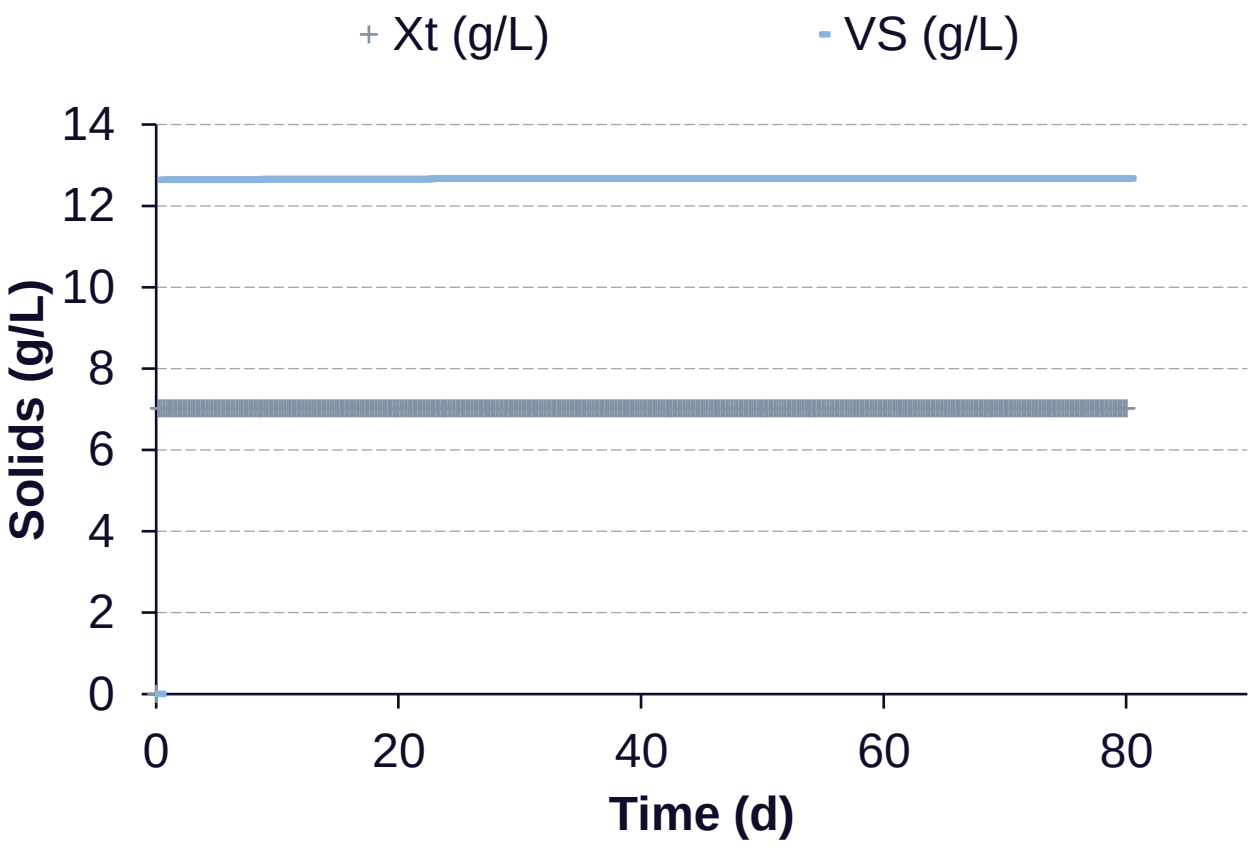


Figura 76: Gráfico remoción de solidos vs tiempo (días).

7. Análisis y Discusión

7.1. Análisis de Simulación

Como se aprecia en los resultados, la cantidad de biogas generado en la simulación no es tan considerable. Se pudo recolectar alrededor de 300 Litros en un periodo de 30 días y 784 litros en 80 días. Esto no obstante no es tajante o no significa que el proyecto es inviable, todo lo contrario. Debido a que esta simulación fue realizada a una escala bastante mas pequeña que el biodigestor y en condiciones mucho mas desfavorables. Por lo que ante estas variables la producción de metano se vuelve adecuada a los parametros de operación del reactor. A continuación se mencionan los posibles efectos adversos que se detectaron en la simulación:

El Volumen del Reactor: Como se menciono anteriormente el tamaño y por ende el volumen de la simulación es bastante reducido en comparación con el diseño propuesto, por lo que es esperable que la cantidad de biogas que se produce sea mucho menor. Lo dificil es poder establecer un potencial de biogas para el prototipo a partir de la simulación realizada, ya que este no es de carácter lineal sino que de tipo exponencial, pero esto a su vez juega a nuestro favor ya que la producción de biogas aumentara drasticamente en el prototipo.

La composición de las Heces: Los valores caracteristicos encontrados para las heces son bastante variables y van a depender de muchos factores como por ejemplo la dieta de la persona, la cantidad producida, la cantidad de hormonas y remedios que la persona pueda consumir, etc. Estos datos fueron recolectados de varios papers disponibles en la web, pero aun no hay datos concretos definitivos por lo que aun no es posible definir una composición correcta. Entre los datos destacan la cantidad de sales presentes en las heces como por ejemplo la concentración de Ca+2, Na+, K+, SO4(-2), etc, que cumplen un rol inhibitorio en el proceso metanogenico, por lo que una alta concentración de estas puede ser nocivo para la producción de biogas. En este caso las concentraciones de sales utilizada fue mas alta de lo usual debido a que en la bibliografía seleccionada aparecía de esta forma. Por lo que claramente el potencial de emisión de metano se vio disminuido.

La no inclusión de substratos alternativos en el proceso de co-digestión: La co-digestión como se dijo anteriormente es el proceso de mezclar diferentes tipos de substratos para así aumentar la producción de biogas en el proceso anaerobico. Pero no obstante esto muchas

veces puede generar una disminución si es que no se logra un ratio de concentraciones adecuado o si no se consideran todas las opciones posibles. En este caso solo se tomo en cuenta el rendimiento de las heces humanas sin una combinación con otro tipo de substrato por lo que al comparar con otras simulaciones y ensayos experimentales la producción disminuye, debido a que esta demostrado a pesar de que las heces humanas tengan un potencial promedio, la inclusión de diferentes elementos como residuos alimenticios, excrementos de animales o desperdicios organicos como vegetales o derivados es altamente recomendable pues se ha podido comprobar que esto aumenta la generación de biogas, si es que se cuenta con un buen sistema de homogenización en el digestor.

7.2. Comparacion con Ensayo Teórico

En un estudio realizado el año 2020 se investigó la aplicación del modelo de decisión multicriterio (MCDM) en la codigestión anaeróbica por lotes de residuos de alimentos de cocina (FW) y el lodo fresco del tanque séptico (STS). El experimento por lotes fue se lleva a cabo a una temperatura de 37 ± 2 °C y con diferentes relaciones de FW y STS. Se adoptaron sobre la base de sólido volátil (VS) como estrategia de co-digestión durante 90 días de período de digestión. Resultados revelados que experimentalmente, la mono-digestión de FW mostró un rendimiento máximo de biogás [544 ± 65 mL/g VS] seguido de mezcla relación de 75:25 (FW: STS) con un rendimiento de 470 [mL/g VS]. Sin embargo, la mono-digestión del STS mostró solamente 150 ± 15 [mL/g VS] reduciendo drásticamente la producción de biogás y también mostró efecto negativo sobre la digestión con FW para cada mezcla sobre la base VS debido a que el STS es alto en minerales. MCDM reveló que el FW es la mejor alternativa posible entre las otras mezclas con STS teniendo en cuenta el pH y la demanda química de oxígeno.

Los modelos de decisión multicriterio se centran en la elección, la clasificación y la clasificación. El MCDM se aplica normalmente para un ambos conjuntos indefinido y definido de escenarios. La digestión anaeróbica de diferentes combinaciones de FW y STS presenta un conjunto de escenarios definidos que tienen un conjunto de salidas definido. Aquí para la codigestión anaeróbica, el pH, la alcalinidad, el rendimiento de biogás, la C/N y la reducción

de VS pueden considerarse como conjunto de definido de salida. Para el conjunto de escenarios definido, hay muchas técnicas de MCDM como ELECTRE (elimination et choix traduisant la realit'e), PROMETHEE (método de organización de clasificación de preferencias de evaluación de enriquecimiento), TOPSIS (técnica para la preferencia de orden por similitud con la solución ideal) y VIKOR (VlseKriterijuska Optimizacija I Komoromisno Resenje). Para este estudio, se han seleccionado las técnicas VIKOR y TOPSIS, ya que estas dos técnicas se han explorado para la digestión anaeróbica en estado sólido. Los índices utilizados en el análisis son el índice VIKOR para el análisis VIKOR y el índice de cercanía (IC) para el análisis TOPSIS y estas son expresiones matemáticas. Tanto el índice VIKOR para el análisis VIKOR como el índice de cercanía para el análisis TOPSIS proporcionan rangos a las alternativas de entrada. Para el análisis de VIKOR, el índice de VIKOR más pequeño es la mejor solución que emplea el método VIKOR. El índice VIKOR, en general, propone una solución que se acerca al punto ideal. TOPSIS define un índice llamado índice de proximidad (IC) a la solución ideal **(Kesharwani & Bajpai, 2020)**.

S. No.	Samples	PH	VS reduction (% of TS)	VS reduction as g/L	COD (mg/L)	Alkalinity (mg/L as $CaCO_3$	Biogas yield (ml/g VS)	C/N
1	Blank	7.5	17.75	0.335	6160.0	150.0	28.23	22.0
2	STS only	7.3	32.0	0.64	4060.0	150.0	150.03	15.0
3	FW only	7.8	43.0	0.86	6800.0	250.0	544.10	33.0
4	25:75 (FW: STS)	7.3	35.0	0.70	5700.0	300.0	274.54	21.0
5	50:50 (FW: STS)	7.6	36.0	0.72	6840.0	200.0	367.63	24.0
6	60:40 (FW: STS)	7.1	38.0	0.76	6896.0	300.0	462.49	27.0
7	75:25 (FW: STS)	7.7	41.0	0.82	5080.0	155.0	470.00	30.0

Figura 77: Potencial bioquímico del biogás a diferentes ratios de mezclas. Fuente: (Kesharwani & Bajpai, 2020).

7.3. Comparaciones con Ensayos Experimentales.

En la literatura se lograron encontrar diversos proyectos y ensayos cuyo objetivo principal es describir el rendimiento de las heces humanas y otros residuos para la generación de biogas y poder explotar este recurso en diversas aplicaciones para reducir tanto la huella de carbono como la precariedad de los sistemas sanitarios y a su vez aumentar el desarrollo social de diversas poblaciones humanas y dar solución a la crisis energética que estamos viviendo.

En uno de los ensayos llevado acabo el año 2014 en Indonesia por el Instituto cientifico de Indonesia, lograron diseñar un sistema de generación para una comunidad de escasos recursos en donde casi no existe una correcta sanitización de los desperdicios humanos. En este trabajo se planteo un universo de 10.000 personas, en donde se logro obtener una producción de heces de alrededor de 2500 [kg/día]. Contabilizando una producción de biogas de 106,85 [m^3], entregando un potencial de biogas de 0.028 [m^3/kg residuo seco]. No obstante mencionan que el bajo valor del ratio carbono nitrogeno [C/N] de las heces humanas puede jugar un valor en contra a la producción, lo que implica que el uso de la co-digestión para el proceso anaerobio es de vital importancia. Esto llevandolo al contexto en cuestión y el diseño planteado generaría una cantidad de 0.28 m^3 en un perido de 30 días. Algo bastante similar al entregado por la simulación **(Andriani et al., 2015).**

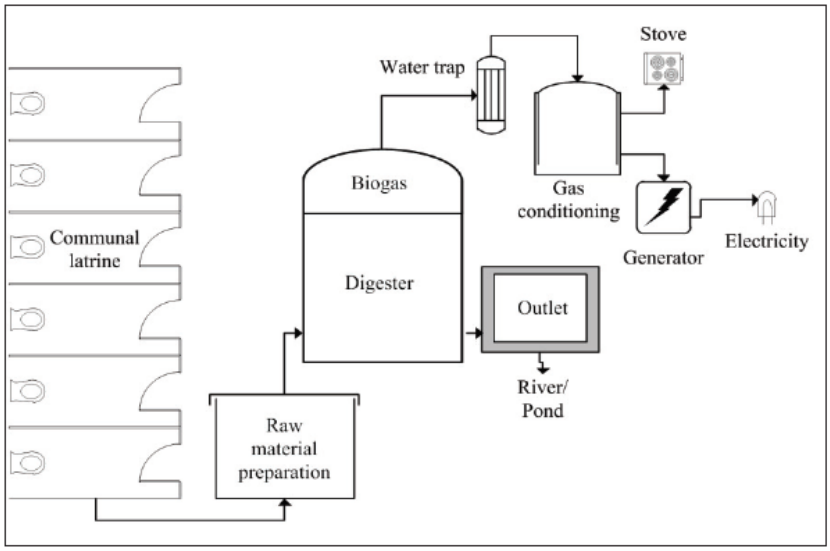
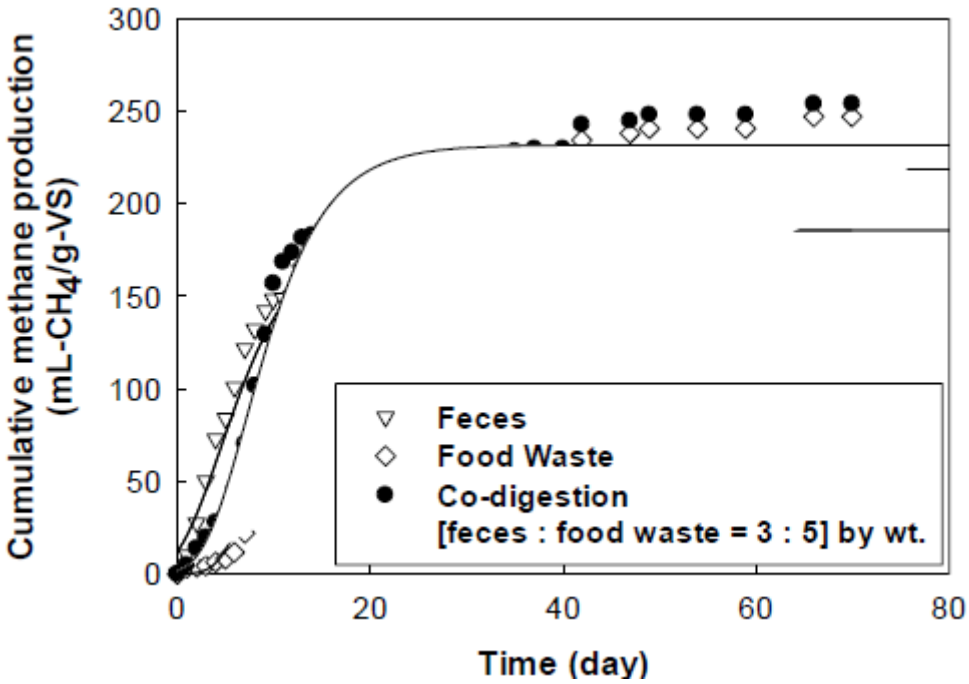


Figura 78: Sistema de generación de biogás propuesto utilizando heces humanas. Fuente: (Andriani et al., 2015)

En el segundo ensayo experimental estudiado del año 2014 realizado por el departamento de ingeniería de la Universidad Nacional de Seúl, Corea del Sur, se tiene una serie de ensayos tipo batch de 250 mililitros cada uno en donde utiliza como substrato las heces humanas y desechos alimenticios, realizando ensayos por separado para cada substrato y juntos utilizando el metodo de la co-digestión. En este caso calcularon el potencial bioquimico del metano (BMP) y mediante la ecuación modificada de Gompertz predijo la producción maxima de cada ensayo según los diferentes parametros de composición **(Young et al., 2014).**



$$M = P\exp\left[-\exp\left\{\frac{R_e \cdot e}{P}(\lambda - t) + 1\right\}\right]$$

Figura 79: Producción acumulada de metano medida en el tiempo. Fuente: (Young et al., 2014).

En el estudio se logro una producción de biogas de 220.01 [mL CH_4/g VS] para las heces humanas y de 245.02 [mL CH_4/g VS] para la co-digestión de ambos substratos en un tiempo de 70 días y una temperatura de 35°C. Esto reflejado en la simulación planteada en este trabajo equivale a una cantidad de 37 Lgas/día. Esto casi triplica la producción obtenida en la simulación. Esto da buenas señales que en un ensayo pactico la producción de biogas es

bastante mas elevada a lo que se obtiene en un ensayo teórico.

En el tercer caso estudiado se tiene un estudio realizado por el departamento de ingeniería mecanica de la Universidad de KhonKaen, Tailandia. Esta investigación tenía como objetivo estudiar la producción de biogás a partir de heces humanas y residuos comunitarios de alimentos mediante proceso de fermentación por lotes. En este experimento, había 5 tipos de relación entre las heces humanas y los alimentos de desecho de la comunidad que eran 1:0, 2:1, 1:1, 1:2 y 0:1 y la materia prima se diluye con agua en la proporción 1:4. El digestor de biogás era cilíndrico de plástico transparente tanque de 20 litros, área base de 300 centímetros cuadrados y altura de 30 centímetros. Este experimento se realizó para analizar la tasa de generación de gas antes y después de la composición de biogás valor de fermentación y calentamiento del biogás. Se encontró que, en la proporción 2:1 de la heces humanas y residuos comunitarios de alimentos, la tasa de generación de biogás fue la más alta. En la proporción de 1:0, la generación de gas metano fue la más alta, ya que la composición del gas metano es 67.6% más alta que el de otros animales estiércol, la tasa de generación de biogás fue de 0,59 m3/kg-VS y el valor de calentamiento era 24.336 MJ/Nm3 **(Poocheera et al., 2014)**.

Experiment	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex5
1st	1.9401	2.181	2.0681	0.9472	N.A.
2nd	1.7617	2.0232	1.7193	0.8434	N.A.
3rd	1.8654	2.1062	1.819	0.914	N.A.
Average	1.8557	2.1035	1.8688	0.9015	N.A.

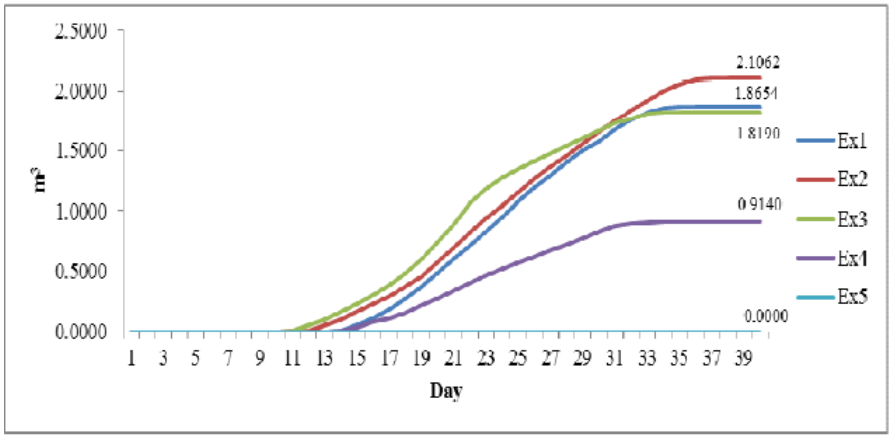
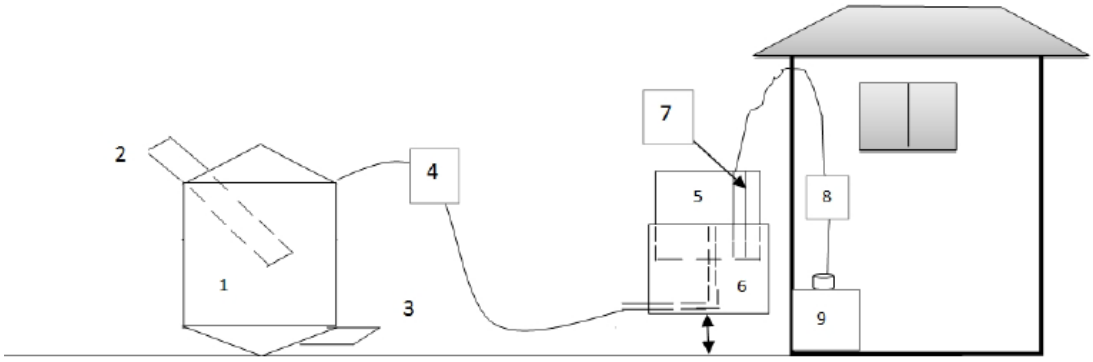


Figura 80: Potencial bioquímico de biogás y producción acumulada biogás en el tiempo. Fuente: (Poocheera et al., 2014)

Esto nuevamente nos muestra que la cantidad de biogás generada es bastante mayor a la esperada en la simulación, lo que otorga mayor confianza en este tipo de proyecto.

Finalmente en el ultimo ensayo estudiado ,realizado el año 2013 en el Departamento de Ciencias Biologicas en la Universidad Covenant, Nigeria, que es el mas similar al planteado en esta tesis se tiene lo siguiente. En este se realizó una investigación sobre el diseño y la construcción de un sistema de digestor anaeróbico a partir de materias primas disponibles localmente materiales que utilizan tecnología local y la producción de biogás a partir de residuos alimentarios y excrementos humanos generados dentro de un campus universitario. El experimento duró 60 días utilizando un digestor anaeróbico a escala de laboratorio de 40 litros. El volumen de gas generado a partir de la mezcla era de 84,750 cm^3 y comprendía un 58% de CH4, un 24% de CO2 y un 19% de H2S y otras impurezas. La fisicoquímica de la materia prima en el digestor reveló una inicial caída en el pH a un rango más ácido y un aumento constante 4.52 – 6.10. La temperatura se mantuvo relativamente constante en el rango mesófilo: 22,0ºC– 30,5ºC durante todo el estudio. La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) de la materia prima antes de la digestión estaba dentro de 139:1. Las distribuciones de la población de la microflora muestran bacterias aeróbicas y anaeróbicas para incluir Klebsiella spp, Bacillus spp, Escherichia coli, Clostridium spp y un metanógeno de la clase Methanococcus. En este caso la cantidad de biogás producida es tres veces menor a la que se obtiene en las simulaciones, pero el porqué de esto es debido a que al ser un diseño experimental sin inclusión de subsistemas externos como los que se plantean en esta tesis y enfrentar diversos cambios adversos durante el proceso anaerobio, llevo a una drástica disminución de la cantidad de gas producido. No obstante, se menciona de manera esperanzadora que la co-digestión anaeróbica de la mezcla de excrementos humanos y desechos alimenticios es una solución altamente eficaz para tratar la situación energética y sanitaria de una población de escasos recursos **(Schwartz et al., 2015).**



1. Digester Body; 2. Feedstock Inlet pipe; 3. Effluent Outlet pipe; 4. Hose from digester to gas holder; 5. Gas holder; 6. Water Jacket ; 7. Rule; 8. Hose to gas cooker; 9. Gas cooker.

Figura 81: Esquema de sistema de generación de biogás del proyecto. Fuente: (Schwartz et al., 2015).

7.4. Discución

En este trabajo en general se ha realizado un estudio acerca de la viabilidad del proyecto tanto a nivel sanitario como energetico. En la etapa de investigación se ha logrado comprobar que la eliminación de patogenos mediante la digestión anaerobica en un regimen mesofilico es bastante aceptable y ayuda drasticamente a reducir la carga viral y bacterial de los desechos humanos para su posterior manipulación y tratamiento, evitando así problemas de salud como enfermedades altamente nocivas para la salud humana y planteando una solución para el creciente estrés hidrico y contaminación ambiental que se esta padeciendo en diferentes lugares de Chile, junto con entregar un recurso energetico beneficioso para la vida del hogar. No obstante bajo estas condiciones de operación no es posible eliminar el 100% de los patogenos presentes en las heces, sin hablar del alto contenido de hormonas y antibioticos debido al consumo de farmacos en la dieta de las personas.

Para esto fue que se planteo la idea de un segundo equipo de tratamiento como lo es una compostera, en donde se asegura una buena eliminación de estos compuestos y por lo tanto da la facilidad de poder reutilizar los desperdicios como biosolidos, es decir, como un tipo de abono o fertilizante para la tierra y poder incentivar el cultivo de flora en un lugar.

Junto con lo anterior se determino que para generar un correcto proceso de digestión anaerobia es necesario contar con diferentes sub-sistemas que permitan el buen

funcionamiento de los procesos anerobios dentro del biodigestor como lo son el control de la temperatura, una correcta homogenización del digestato y su respectivo post-tratamiento.

Ahora en cuanto a lo que es ensayos experimentales se planteo una metodología para realizar ensayos tipo batch en el laboratorio y determinar el potencial de biogas que pueda tener cada substrato en cuestión. Para esto es necesario utilizar el metodo de la co-digestión para determinar los ratios de mezcla entre ellos y determinar cual conjunto permite la mayor producción de biogas. En los estudios observados se logro demostrar que la mejor mezcla es la de desechos alimenticios con las heces humanas. Esto por que son los recursos a los que mas facil se tiene el acceso y que estan en suficiente abundancia para poder reutilizarlos en este proceso.

Lo que ocurre es que aunque se haya demostrado teoricamente que la inversión y diseño de todos los elementos es viable, sigue siendo necesario que se hagan ensayos empiricos del sistema en su conjunto ya que se debe evaluar el rendimiento de todos los procesos y equipos a diferentes condiciones de operación para establecer las optimas condiciones de funcionamiento y que cambios o modificaciones se deberian realizar para reducir los costos de diseño o como aumentar la cantidad de biogas generado para así contar con un sistema autosustentable que pueda satisfacer todas las necesidades energeticas que se requieren en un hogar.

En cuanto a la producción de biogas que se obtuvo mediante las simulaciones, estas son bastante promedio y aunque quizas no sean de carácter cuantioso permite predecir que cambios o consideraciones tener para la cantidad que se pueda producir en los ensayos experimentales.

Application	1 m^3 biogas equivalent
Lighting	equal to 60 -100 watt bulb for 6 hours
Cooking	can cook 3 meals for a family of 5 - 6
Fuel replacement	0.7 kg of petroleum
Shaft power	can run a one horse power motor for 2 hours
Electricity generation	can generate 1.25 kilowatt hours of electricity

Figura 82: Aplicaciones que tiene 1 metro cúbico de biogás. Fuente: (Andriani et al., 2015)

Por ejemplo en la Figura 82 se muestra que es posible hacer con 1 [m^3] de biogas. En las simulaciones se entrega una cantidad aproximada de 300 litros de biogas generados en un periodo de 1 mes. Esto equivale a aproximadamente una comida en un día para una familia de 5 personas. Aunque esto suene poco para un tiempo extenso de generación, es importante destacar que el tamaño del biodigestor diseñado es bastante mayor al que se plantea en la simulación y a pesar de que no es correcto escalar la producción de forma linear, aplicando este metodo se logra una producción diaria de 100 litros de biogas. Lo que en un mes genera 3 [m^3], permitiendo así muchas mas opciones de aprovechamiento energetico. No obstante una de las cosas que se propone es aumentar el tamaño del reactor. Esto debido a que su costo bajo estas medidas quizas sea mayor que si se opta por algun modelo comercial que este disponible en el mercado. De esta forma si es posible aumentar el tamaño 3 veces el actual, es decir con una capacidad de 500 litros aproximadamente, es posible sustentar un hogar de la energía suficiente para satisfacer todas las necesidades energeticas que se puedan presentar.

Finalmente se plantea un uso eficiente y rentable del recurso hidrico que es uno de los objetivos principales de este trabajo. Se habla de reducir 75 veces el consumo de agua de un hogar con este sistema lo que implica tanto una reducción economica para el gasto familiar y ademas transformar una viviendo en un proyecto autosustentable que pueda ser capaz de generar su propia agua mediante el sistema de purificación de orina. Esto podria llegar resultar en un reciclaje de alrededor de 200 litros de agua mensuales para uso cotidiano y en otras actividades humanas. Combatiendo asi la sequía y dando una posible solución al estrés hídrico para las regiones mas vulnerables del país.

7.5. Trabajos Futuros

Debido a que esta tesis fue planteada desde un punto teoríco y de investigación, es necesario realuzar un trabajo empirico del diseño y funcionamiento del prototipo y sistemas alternos. Es por eso que a continuación se plantean los trabajos futuros que se deben hacer para continuar el proyecto:

- Realizar los ensayos experimentales tipo batch en el laboratorio para determinar el potencial bioquimico de biogas de las heces humanas y en conjunto con otro tipo de residuos para establecer un ratio adecuado de rendimiento y producción de biogas.

- Realizar la fabricación de todos los componentes del diseño en el laboratorio o taller mecánico utilizando todos los metodos anteriormente sugeridos para cada equipo. Junto con esto realizar las respectivas mediciones y analisis del rendimiento de cada componente en funcionamiento para determinar posibles modificaciones o adiciones al sistema en general.

- Medir la eliminación de los agentes patogenos y compuestos quimicos no deseados de manera experimental para establecer los valores de concentración de estos en el digestato posterior a la reaccion anaerobia y asimismo en el caso del compostaje. De esta manera se podra determinar si es posible reutilizarlos como fertilizante y establecer una comparación con la literatura existente en general.

- Cuantificar la producción de biogas generada en el biodigestor para determinar junto con esto los factores que mas influyen en la producción y corregir cualquier tipo de problemas que puedan surgir. Ademas de analizar el aprovechamiento energetico del biogas y predecir la viabilidad y rentabilidad de proyecto.

- Diseñar el sub-sistema de purificación de orina para la recuperación de agua y evaluar su posible fabricación tomando en cuenta los costos de elaboración y cantidad de recurso hidrico generado para corroborar si es viable desde el punto de vista energetico y autosustentable a largo plazo.

8. Referencias

Andriani, D., Wresta, A., Saepudin, A., & Prawara, B. (2015). A review of recycling of human excreta to energy through biogas generation: Indonesia case. *Energy Procedia*, *68*, 219–225. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.250

Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., & Van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, *59*(5), 927–934. https://doi.org/10.2166/wst.2009.040

Castillo, V. (2013). Diseño y Calculo de un Agitador de Fluidos. *Facultad de Inginieria Departamento de Inginieria Mecánica*, 69. http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo_Uribe_Vladimir.pdf

Corrales, L., Antolinez, D., Bohórquez, J., & Corredero, A. (2015). Anaerobic bacteria: processes they perform and their contribution to life sustainability on the planet. *Nova*, *13*(23), 55–81. http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v13n24/v13n24a06.pdf

García-Gen, S., Lema, J. M., & Rodríguez, J. (2013). Generalised modelling approach for anaerobic co-digestion of fermentable substrates. *Bioresource Technology*, *147*, 525–533. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.063

Jiang, Y., Xie, S. H., Dennehy, C., Lawlor, P. G., Hu, Z. H., Wu, G. X., Zhan, X. M., & Gardiner, G. E. (2020). Inactivation of pathogens in anaerobic digestion systems for converting biowastes to bioenergy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *120*(February 2019). https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109654

Kesharwani, N., & Bajpai, S. (2020). Batch anaerobic co-digestion of food waste and sludge: a multi criteria decision modelling (MCDM) approach. *SN Applied Sciences*, *2*(8), 1–11. https://doi.org/10.1007/s42452-020-03265-1

Mindreau Ganoza, E., Juscamaita Morales, J., & Williams León de Castro, M. (2016). ESTABILIZACIÓN DE HECES HUMANAS PROVENIENTES DE BAÑOS SECOS POR UN PROCESO DE FERMENTACIÓN ÁCIDO LÁCTICA. *Ecología Aplicada*, *15*(2), 143. https://doi.org/10.21704/REA.V15I2.754

Pliego-Arreaga, R., Regalado, C., Amaro-Reyes, A., & García-Almendárez, B. E. (2013). Revista Mexicana de I ngeniería Q uímica. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *12*(3), 505–511. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62029966013

Poocheera, S., Suntivarakorn, R., & Treedet, W. (2014). Biogas production from human faece and community waste food. *Advanced Materials Research*, *931–932*(May 2014), 1101–1105. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.931-932.1101

Schwartz, G., Van Olst, J. C., & Brune, D. E. (2015). Co-digestion of food waste and algae biomass for biogas production. *Applied Engineering in Agriculture*, *31*(6), 841–846. https://doi.org/10.13031/aea.31.11291

Tian, Z., Cabrol, L., Ruiz-Filippi, G., & Pullammanappallil, P. (2014). *Microbial Ecology in*

Anaerobic Digestion at Agitated and Non-Agitated Conditions. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109769

Trisakti, B., Irvan, Zahara, I., Taslim, & Turmuzi, M. (2017). Effect of agitation on methanogenesis stage of two-stage anaerobic digestion of palm oil mill effluent (POME) into biogas. *AIP Conference Proceedings*, *1840*(February 2018). https://doi.org/10.1063/1.4982278

Volpin, F., Chekli, L., Phuntsho, S., Ghaffour, N., Vrouwenvelder, J. S., & Shon, H. K. (2019). Optimisation of a forward osmosis and membrane distillation hybrid system for the treatment of source-separated urine. *Separation and Purification Technology*, *212*(August 2018), 368–375. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.003

Wang, S., Ma, F., Ma, W., Wang, P., Zhao, G., & Lu, X. (2019). Influence of temperature on biogas production efficiency and microbial community in a two-phase anaerobic digestion system. *Water (Switzerland)*, *11*(1). https://doi.org/10.3390/w11010133

Woolley, S. M., Cottingham, R. S., Pocock, J., & Buckley, C. A. (2014). Shear rheological properties of fresh human faeces with different moisture content. *Water SA*, *40*(2), 273–276. https://doi.org/10.4314/wsa.v40i2.9

Young, T., Jongkeun, K., & Kim, J. Y. (2014). Evaluating Methane Potential and Kinetics of Anaerobic Co-digestion with feces and food waste. *Advances in Civil, Environmental, and Material Research*, *Rajagopal 2013*.

Youngquist, C. P., Mitchell, S. M., & Cogger, C. G. (2016). Fate of Antibiotics and Antibiotic Resistance during Digestion and Composting: A Review. *Journal of Environmental Quality*, *45*(2), 537–545. https://doi.org/10.2134/jeq2015.05.0256

Oliden,C. (2020). Propuesta de prototipo de baño seco con sistema de tratamiento de digestión anaerobica, para el tratamioento de heces humanas. Universidad Tecnica Federico Santa María.

Montalvo, S, Guerrero, L. (2003).Tratamiento Anaerobio de Residuos. Universidad Tecnica Federico Santa María.

ONU. (2019). No dejar a Nadie Atrás.

ONU-OMS. (2018). Progresos en Materia de agua potable, saneamiento e higiene.

CR2. (2015). Informe a la Nación de la megasequía 2010-2015: Una leccion para el futuro.

Strande, L., Ronteltap, M., & Brdjanovic, D. (2016). Manejo de Lodos Fecales. In *Water Intelligence Online* (Vol. 15). https://doi.org/10.2166/9781780408026

Ottoson, J. R., Schnürer, A., & Vinnerås, B. (2008). In situ ammonia production as a sanitation agent during anaerobic digestion at mesophilic temperature. *Letters in Applied Microbiology*, *46*(3), 325–330. https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2007.02317.x

Hagenmeyer, M. (2003). *Digestión anaerobia seca versus digestión anaerobia húmeda*. 1–23.

García-Gen, S., Sousbie, P., Rangaraj, G., Lema, J. M., Rodríguez, J., Steyer, J. P., & Torrijos, M. (2015). Kinetic modelling of anaerobic hydrolysis of solid wastes, including disintegration processes. *Waste Management*, *35*(1), 96–104. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.012

P. Fraga. (2016). Principales tipos de biorreactores. *About.Com En Español, 2016*, 64. http://www.aulavirtual-exactas.dyndns.org/claroline/backends/download.php?url=L1RFT1JJQS9DbGFzZV8xMV8tX0Jpb3JyZWFjdG9yZXNfMjAxOS5wZGY%3D&cidReset=true&cidReq=BIOTOPT%0Ahttp://bicicletas.about.com/od/lobasico/tp/Principales-Tipos-De-BZicicleta.htm

Verstraete, W., Van de Caveye, P., & Diamantis, V. (2009). Maximum use of resources present in domestic "used water." *Bioresource Technology*, *100*(23), 5537–5545. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.047

Rose, C., Parker, A., Jefferson, B., & Cartmell, E. (2015). The characterization of feces and urine: A review of the literature to inform advanced treatment technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *45*(17), 1827–1879. https://doi.org/10.1080/10643389.2014.1000761

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. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.063

Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V, Pavlostathis, S. G., & Rozzi, A. (n.d.). ADM1-WST.pdf. *Enzyme.Chem.Msu.Ru*, *1*(1), 65–74. http://www.enzyme.chem.msu.ru/ekbio/article/ADM1-WST.pdf

Jönsson, H., Baky, A., Jeppsson, U., Hellström, D., & Kärrman, E. (2005). Composition of Urine, Feaces, Greywater and Biowaste for Utilisation in the URWARE Model. Report 2005:6. *Urban Water Report*, *2005:6*, 1–49.

Derese, S., & Verliefde, A. R. D. (2016). Full Nitrogen Recovery and Potable Water Production From Human Urine By Membrane Distillation. *AMTA/AWWA Membrane Technology Conference*, 15. https://biblio.ugent.be/publication/7196702/file/7196710.pdf

García-Gen, S., Rodríguez, J., & Lema, J. M. (2014). Optimisation of substrate blends in anaerobic co-digestion using adaptive linear programming. *Bioresource Technology*, *173*, 159–167. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.089

Dumontet, S., Dinel, H., & Baloda, S. B. (2012). Pathogen Reduction in Sewage Sludge by Composting and Other Biological Treatments: A Review. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/01448765.1999.9755243*, *16*(4), 409–430. https://doi.org/10.1080/01448765.1999.9755243

Baez Beltrán, I. C., Carrillo Bravo, C. O., Castelblanco Marciales, O., Betancourt Cortez, F. J., Leguizamón Sierra, G., García, R. G., & Mendoza Patiño, D. (2018). Metodología de Diseño de Producto bajo la estructura de Innovación y Creatividad.

Estudio de revisión. *Espacios*, *39*(11).

Budzinski, S., Barlatey, A., Pinasco, H., Ontivero, T., & Lopez, J. (1992). Tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) por medio de digestión seca. *Tecnored Consultores SA, Mitre 857*, 6. file:///C:/Users/pc/Downloads/hpinasco-02-extenso.pdf

Pathak, B. (2015). Sanitation and Energy. *Sulabh International Academy of Enviromental Sanitation.*

Schouw, N. L., Danteravanich, S., Mosbaek, H., & Tjell, J. C. (2002). Composition of human excreta - A case study from Southern Thailand. *Science of the Total Environment*, *286*(1–3), 155–166. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00973-1

FAO, MINENERGIA, PNUD, & GEF. (2011). Manual del Biogás. *Proyecto CHI/00/G32*, 120. http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf

UNICEF, (2015). Progress on sanitation and drinking water.

País Circular (2019). Agenda 2030 / Transición Hídrica. https://www.paiscircular.cl/agenda-2030/el-60-de-escasez-de-agua-en-chile-es-causada-por-una-mala-gestion-del-recurso-aumento-de-actividades-y-sobretorgamiento-de-derechos.

Marco, A., & Ortiz, A. (2015). *Desarrollo de un simulador numérico basado en ADM1 de un reactor anaerobio ASBR*.

Krich, K., Augenstein, D., Batmale, J., Benemann, J., Rutledge, B., & Salour, D. (2005). Storage and Transportation of Biogas and Biomethane. *Biomethane from Dairy Waste: A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California*, 71–80.

IPCC. (2019). Calentamiento Global de 1,5 °C. In *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

B., Moraga, Bahamondes, P., Cerda, C. D. La, Elliot, Ávila, M., A., Quiroz, H., & Soto, P. (2017). *Guía para el instalador de plantas de biogás de mediana y gran escala*. 246.

IDAE. (2007). Biomasa: Digestores anaerobios. In *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)*. http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf