UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO A NIVEL CONCEPTUAL DE UN BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A NIVEL RESIDENCIAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

JAVIER IGNACIO ROJAS JEANNERET

PROFESOR GUÍA:
LEONEL NÚÑEZ LAZO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MANUEL ALARCÓN VIVERO
AQUILES SEPÚLVEDA OSSES

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: JAVIER IGNACIO ROJAS JEANNERET
FECHA: ENERO 2019
PROF. GUÍA: LEONEL NÚÑEZ LAZO

DISEÑO A NIVEL CONCEPTUAL DE UN BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A NIVEL RESIDENCIAL

En lo que va del siglo XXI se ha generado una conciencia importante sobre los efectos, a corto y largo plazo, de las acciones del ser humano y sus repercusiones en el planeta. Con esto como base, se ha inculcado de a poco una tendencia a incentivar iniciativas amigables con el medio ambiente. En particular, este trabajo se motiva a partir de la necesidad de buscar métodos que reduzcan el impacto ambiental de los residuos domiciliarios, procurando generar recursos aprovechables por los mismos usuarios.

El objetivo del presente documento es diseñar un biodigestor para la producción de biogás a nivel conceptual, técnicamente viable y con aplicaciones a nivel residencial. Esto incluye realizar una revisión bibliográfica de las tecnologías utilizadas para la producción de biogás, identificar el contexto en el cual se implementaría el equipo y desarrollar la ingeniería conceptual del biodigestor.

Para el desarrollo de este trabajo se realizó un estudio detallado de los parámetros más influyentes en el proceso de digestión anaeróbica y de las principales experiencias exitosas que se han desarrollado a nivel mundial. Luego, se recopilaron antecedentes sobre el estado de los residuos sólidos municipales en su fuente de origen y se realizó una caracterización de la población nacional con el objetivo de ajustar el diseño del equipo a ella.

Como resultado se obtuvo una serie de planos a nivel de perfil, inspirado en tecnología industrial existente, con detalles en los sistemas más importantes para su funcionamiento. Se definieron los componentes que lo conforman y se hizo una aproximación de los requerimientos que deben cumplir los elementos. Además se realizó una estimación de biogás generado en función de la producción de basura orgánica y la distribución de habitantes por casa, y se hizo un presupuesto tentativo del costo de producción de una unidad.

El equipo es operable por un usuario no especializado y consta de 2 reactores unidos por mangueras para el transporte de gas y líquido, con una trituradora de comida incorporada en la entrada. Se considera también 1 calefactor de inmersión por cada reactor, y 1 sistema de agitación impulsado por un motoreductor, todo controlado por un controlador PID. El costo de producción es de $2.050.000 y el proyecto tiene un VAN de $-2.820.550.

Dado que los resultados aquí expuestos corresponden a cálculos teóricos, es necesario que éstos sean validados mediante experiencias empíricas para poder comprobar tanto la generación de biogás como los costos de operación en condiciones reales.

A la Universidad, cuyo norte sea Chile y las necesidades de su pueblo.

Agradecimientos

Agradecer especialmente a todos los que han estado y estuvieron a lo largo de todo esto. Un abrazo y mi más profundo cariño.

Tabla de Contenido

1. Introducción **1**

2. Objetivos y Alcances **3**
2.1. Objetivos . . . 3
2.1.1. Objetivo General . . . 3
2.1.2. Objetivos Específicos . . . 3
2.2. Alcances . . . 3

3. Metodología **4**

4. Antecedentes **5**
4.1. Biomasa . . . 5
4.2. Biogás . . . 5
4.3. Digestato . . . 7
4.4. Biodigestión . . . 8
4.4.1. Etapas del Proceso . . . 8
4.4.2. Parámetros . . . 10
4.4.3. Cinética . . . 14
4.5. Biodigestor . . . 15
4.5.1. Clasificación . . . 15
4.5.2. Experiencias . . . 17

5. Procedimiento **20**
5.1. Caracterización de Materia Prima . . . 20
5.1.1. Diseño del Muestreo . . . 21
5.1.2. Resultados Preliminares . . . 24
5.1.3. Conclusiones Preliminares . . . 24
5.2. Caracterización del Público Objetivo . . . 27
5.2.1. Análisis Nacional . . . 27
5.2.2. Análisis Socioeconómico . . . 33
5.3. Definición de Proceso . . . 38
5.4. Selección de Tecnología . . . 39
5.5. Estimación de Biogás . . . 40
5.6. Criterio Económico . . . 42

6. Diseño General **43**
6.1. Identificación de Subsistemas . . . 43

6.1.1. Subsistema de Alimentación 43
6.1.2. Subsistema del Reactor 43
6.1.3. Subsistema de Agitación 43
6.1.4. Subsistema de Calefacción 44
6.1.5. Subsistema de Soporte 44
6.2. Definición de Subsistemas 44
6.2.1. Subsistema de Alimentación 44
6.2.2. Subsistema del Reactor 45
6.2.3. Subsistema de Agitación 47
6.2.4. Subsistema de Calefacción 49
6.2.5. Subsistema de Soporte 50

7. Resultados **52**
7.1. Planos 52
7.2. Cubicación 52
7.3. Análisis Económico 54

8. Conclusiones **56**

A. Código Stata **68**

B. Memoria de Cálculo Subsistema Alimentación **72**

C. Memoria de Cálculo Subsistema Reactor **74**
C.1. Cálculo de Dimensiones 74
C.2. Cálculo del Espesor 75

D. Memoria de Cálculo Subsistema Agitador **77**
D.1. Velocidad de Giro 77
D.2. Potencia Requerida 77
D.3. Velocidad Crítica 78

E. Memoria de Cálculo Subsistema Calefacción **80**

F. Memoria de Cálculo Subsistema Soporte **82**
F.1. Peso del Equipo 82
F.2. Pandeo en Elementos Críticos 84
F.3. Fuerza Sísmica 85

G. Planos de Conjunto **86**

H. Planos de Detalle **88**

Índice de Tablas

4.1. Composición del Biogás 6
4.2. Características Generales del Biogás 6
4.3. Comparación del Potencial Energético del Biogás 7
4.4. pH Para Cada Etapa del Proceso 12

5.1. Equivalencia Clasificación Esomar y Casen 21
5.2. Comunas de Mayor Representatividad Según GSE 22
5.3. Composición Resultante de RSD, Provincia de Gran Santiago, Según GSE y Categorías de Primer Orden, Sector Residencial 25
5.4. Resultado Promedio de Producción Per Cápita para cada GSE 25
5.5. Producción Per Cápita Promedio de FORSM por GSE 26
5.6. Cantidad de Hogares y Viviendas 27
5.7. Distribución de Viviendas por Sitio 28
5.8. Distribución de Hogares por Vivienda 28
5.9. Distribución de Personas por Hogar 28
5.10. Distribución de Tipos de Vivienda 29
5.11. Distribución de Personas por Casa 29
5.12. Comunas Representativas 33
5.13. Personas por Hogar para cada GSE 34
5.14. Tipo de Vivienda por GSE 34
5.15. Personas por Casa 34
5.16. Procedencia del Agua 35
5.17. Distribución del Agua 35
5.18. Disponibilidad de Energía Eléctrica 35
5.19. Combustibles Usados por GSE ABC1 y C2 36
5.20. Combustibles Usados por GSE C3 y D 36
5.21. Combustibles Usados por GSE E 37
5.22. Percepción de Basura en las Calles para Todos los GSE 37
5.23. Análisis de Decisión Multi Criterio para Selección de Reactor 40
5.24. Parámetros Cinéticos a Distintos Valores de ST 41
5.25. Datos Usados Para Ajuste 41
5.26. Componentes Flujo de Dinero 42

6.1. Dimensiones del Reactor 45
6.2. Dimensiones de la Turbina 48
6.3. Valores Utilizados Potencia Agitador 48

6.4. Resumen de Parámetros del Agitador 49
6.5. Datos Técnicos Motoreductor 49

7.1. Cubicación Subsistema Alimentación 52
7.2. Cubicación Subsistema Reactor 53
7.3. Cubicación Subsistema Agitación 53
7.4. Cubicación Subsistema Calefacción 53
7.5. Cubicación Subsistema Soporte 54
7.6. Resumen Cubicación 54
7.7. Flujos de Dinero 55

C.1. Relaciones de Medida 75

Índice de Ilustraciones

4.1. Representación Esquemática del Proceso de Digestión 9
4.2. Crecimiento de Microorganismos en Función de la Temperatura 11
4.3. Esquema Sistema Biocel 17
4.4. Esquema Sistema Dranco 17
4.5. Esquema Sistema Valorga 18
4.6. Esquema Sistema Kompogas 18
4.7. Esquema Sistema Schwarting-Uhde 19
4.8. Esquema Sistema Linde BRV 19

5.1. Representación Muestreo 23
5.2. Procedencia del Agua 30
5.3. Sistema de Distribución 30
5.4. Disponibilidad de Energía Eléctrica 31
5.5. Combustible Utilizado 31
5.6. Percepción de Basura en las Calles 32
5.7. Diagrama de Flujo del Diseño 39

6.1. Subsistema de Alimentación 44
6.2. Geometría Reactor 46
6.3. Geometría Cabeza Elipsoidal 46
6.4. Esquema Dimensiones Turbina 47
6.5. Calefactor Seleccionado 50

C.1. Dimensiones del Reactor 74

F.1. Esquema de Elementos Críticos 84

Capítulo 1

Introducción

La primera parte del siglo XXI ha traído cambios sustanciales en la sociedad contemporánea. Dentro de todos estos cambios se abarca el cómo la sociedad se relaciona y hace responsable de su entorno. Son estos cambios los que han generado una población consciente de los efectos que producen sus actos y decisiones en el medio ambiente [1].

Es sabido, además, que el manejo de residuos en Chile es un tema problemático [2], dadas las bajas tasas de reutilización y reciclaje. En el país, apenas un 10 % de los residuos generados es reciclado [3], en comparación con el 73 % de basura reciclada en Europa [4]. A partir de aquí es donde comienzan a nacer iniciativas que fomentan la reducción, reutilización y reciclaje de residuos, tanto a nivel industrial como residencial.

Pese a los esfuerzos para reducir el consumo y reutilizar aquello que puede ser reutilizado, sigue existiendo una fracción de los desechos que debe ser generada inevitablemente, producto de consumo básico para la subsistencia de las personas. Dentro de estos desechos, se encuentran los residuos orgánicos.

Generalmente considerados por la población como inofensivos, debido a su propiedad biodegradable, los desechos orgánicos no son considerados en la conciencia colectiva como residuos dañinos para la salud o el medio ambiente, sin embargo, representan una problemática para la sociedad y su entorno [5]. La basura orgánica en descomposición genera riesgos, directos o indirectos, a la salud pública y favorece la proliferación de roedores, insectos y aves de carroña, asociados a la propagación de enfermedades y epidemias. Por otro lado, existe la generación de lixiviados, que puede tener efectos contaminantes en el manto acuífero y el subsuelo, y la generación de gases de efecto invernadero como el metano, siendo éste hasta 20 veces más nocivo para la atmosfera que el dióxido de carbono [6].

Aun cuando la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos pueden ser nocivas para el ser humano, también existe la posibilidad de darles un giro útil a éstos, sometiéndolos a un proceso de descomposición controlada para obtener productos aprovechables.

El proceso de descomposición puede hacerse en presencia de oxígeno, recibiendo el nombre de compostaje, donde se obtiene como producto compost, el cual puede ser utilizado de abono

de fondo o sustituto de fertilizantes químicos [7]. Por otro lado, también existe la posibilidad de realizar el proceso en ausencia de oxígeno, llamándose metanización o biodigestión, y obteniéndose como producto bioabono y biogás.

Para el proceso de biodigestión es necesario un biodigestor. Éste consiste en un reactor cerrado, para lograr ausencia de oxígeno, el cual recibe materia orgánica, y mediante una serie de reacciones fisicoquímicas y la acción de microorganismos, genera biogás [8].

El biogás es una mezcla de distintos compuestos, pero se basa principalmente en metano y dióxido de carbono, variando su composición dependiendo de la materia prima utilizada y de los microorganismos seleccionados [9]. Es esta variación en su composición la que genera diferencia en los valores de poder calorífico, en comparación con el gas natural [10].

El bajo nivel de desarrollo que tiene el país en términos de reciclaje deja un amplio camino en el cual poder avanzar, si se encuentran formas de producir la misma reacción generadora de metano mediante un proceso de descomposición controlada. Captar el metano sintetizado daría como resultado la oportunidad de aprovechar el hidrocarburo, trayendo beneficios ambientales y energéticos para el planeta y su población [11].

Son estos antecedentes los que motivan el estudio de distintas configuraciones y métodos de biodigestión, generando alternativas a los distintos requerimientos de cada usuario. En particular, la motivación de este trabajo radica en proporcionar una contribución al fomento de las energías renovables no convencionales, mediante una guía básica de diseño de biodigestor a pequeña escala, que incentive la evaluación de alternativas de aprovechamiento energético del biogás, como una oportunidad de ahorro en viviendas chilenas.

Capítulo 2

Objetivos y Alcances

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo General

Diseñar un biodigestor para la producción de biogás a nivel conceptual, técnicamente viable y con aplicaciones a nivel residencial.

2.1.2. Objetivos Específicos

i. Realizar una revisión bibliográfica de las tecnologías utilizadas para la producción de biogás.
ii. Identificar el contexto en el cual se implementaría el equipo.
iii. Desarrollar la ingeniería conceptual del biodigestor, con miras a su comercialización en el contexto chileno.

2.2. Alcances

El alcance de este trabajo es desarrollar el diseño de un biodigestor a pequeña escala, obteniendo una ingeniería a nivel conceptual. Esto contempla:

a. Caracterizar el público objetivo y la materia prima necesaria.
b. Generar planos de los principales componentes.
c. Estimar el costo tentativo de un prototipo.

El desarrollo de este trabajo no contempla la fabricación de un biodigestor.

Capítulo 3

Metodología

Para la realización de este trabajo se emplea la siguiente metodología:

i. **Caracterización de biomasa generada a nivel residencial en Chile**:

   Se recopila información sobre la materia prima a utilizar, lo que permite cuantificar su potencial energético y analizar las alternativas de utilización.

ii. **Caracterización del público objetivo**:

   Se realiza un estudio del público objetivo para poder tomar decisiones sobre los distintos parámetros del biodigestor.

iii. **Selección de tecnología mediante las estimaciones de biogás generado**:

   Se escoge una tecnología con méritos técnicos, que sean potencialmente aplicables en las residencias chilenas. La principal variable es la estimación de la producción de biogás, pero se considera además la madurez de la tecnología, la experiencia mundial y los costos de inversión, operación y mantención.

iv. **Diseño del prototipo**:

   Corresponde al proceso de diseño conceptual del biodigestor, considerando tanto los parámetros de diseño obtenidos del trabajo previo como las consideraciones geométricas y espaciales del equipo.

v. **Análisis de los beneficios económicos y ambientales al implementar el prototipo**:

   Se cuantifica el ahorro de desechos residenciales y de energía producida por el biodigestor, tanto en términos monetarios para los usuarios como el impacto al medio ambiente generado por el equipo.

Capítulo 4

Antecedentes

4.1. Biomasa

La biomasa corresponde a la materia orgánica, originada en un proceso biológico, sustentable, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía [12]. Es decir, corresponde a un conjunto de materia orgánica renovable, de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma [13].

En términos generales, la biomasa se compone principalmente de moléculas biológicas como carbohidratos, proteínas, grasas, celulosa y hemicelulosa. En términos elementales, esto se traduce en una composición basada en carbono, oxígeno e hidrógeno, con presencia de nitrógeno, azufre y otros elementos en bajas cantidades [14].

Pese a que la producción de energía por biomasa genera emisiones de CO_2, uno de los mayores gases de efecto invernadero, parte de los agentes que causan el cambio climático, éste es utilizado por la misma biomasa en su proceso de crecimiento. En consecuencia, el CO_2 generado y consumido da un balance neutro o levemente positivo, en comparación con las altas tasas de producción que presenta la combustión de combustibles fósiles [15].

4.2. Biogás

Corresponde a una mezcla gaseosa que se produce como resultado de la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos, debido a la actividad de los diferentes grupos de microorganismos. Es decir, es el producto de reacciones físicas y químicas de un conjunto de microorganismos en un ambiente con ausencia de oxígeno [16]. Este ambiente puede darse de manera natural o inducida.

Pese a que los componentes principales del biogás son conocidos (ver Tabla 4.1), la concentración de éstos depende en gran parte de la composición de los residuos digeridos. Componentes ricos en grasas producen biogás con altos índices de metano, mientras que componentes

basados en carbohidratos generan un gas con iguales proporciones de metano y dióxido de carbono [17]. La calidad general del biogás va a depender del uso que se le quiera dar, sin embargo, va a depender, además, de factores como la temperatura, el tiempo de permanencia en el digestor y de cualquier perturbación en el sistema [18]. La Tabla 4.2 muestra algunas características generales del biogás[1].

Tabla 4.1: Composición del Biogás (Adaptado de [19]).

Componente	**Fórmula**	**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.
Amoniaco	NH_3	<1 % vol.
Hidrógeno	H_2	<1 % vol.
Ácido Sulfhídrico	H_2S	20 – 20.000 ppm

Tabla 4.2: Características Generales del Biogás (Adaptado de [20]).

Variable	**Valor**	
Contenido energético	6,0-6,5	$[kWh/m^3]$
Equivalente de combustible	0,60-0,65	$[l_{petroleo}/m^3_{biogas}]$
Límite de explosión	6-12 %	de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650-750	$[°C]$
Presión crítica	74-88	$[atm]$
Temperatura crítica	-82,5	$[°C]$
Densidad	1,2	$[kg/m^3]$
Masa molar	16,043	$[kg/kmol]$

Dada su composición, el biogás tiene un potencial energético alto. Solo el año 2005, la producción de energía proveniente del biogás en Europa fue equivalente a aproximadamente 2,3 millones de toneladas de petróleo [21]. Puede ser usado directamente para producir calor o electricidad, o puede ser convertido a combustible mejorando sus propiedades [22]. La Tabla 4.2 muestra una comparación del potencial energético del biogás con distintos combustibles.

El aprovechamiento energético del recurso se hace generalmente mediante combustión, según la ecuación obtenida de [24]:

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O + 192\ [kcal/mol]$$

[1]Valores sujetos a la composición del biogás

Tabla 4.3: Comparación del Potencial Energético del Biogás (Adaptado de [23]).

Combustible	**Densidad** $[kg/l]$	**Poder Calorífico** $[kcal/kg]$
Gas Natural	$0,617$[1]	$12,353$
Gas Licuado	$0,525$ (liq.)	$11,010$
Keroseno	$0,797$	$10,418$
Diesel	$0,849$	$10,165$
Biogás (80 % CH_4)	$0,78$ [1]	$7,551$
Carbón Importado	-	$6,600$
Biogás (50 % CH_4)	$1,07$ [1]	$3,443$
Leña	-	$2,492$[2]

[1] Densidad relativa con el aire.
[2] Báse húmeda al 35 % H_2O

Mediante esta reacción, es posible generar energía térmica, la cual se puede utilizar directamente, o transformar en energía eléctrica mediante procesos ya conocidos. Pese a que el aprovechamiento directo es mediante energía calórica, es necesario adaptar fácilmente los quemadores de gas convencionales para cambiar la relación aire/combustible. Para el caso de la generación de energía eléctrica, generalmente se realiza una recuperación de la energía calórica para alimentar el mismo proceso, aumentando la eficiencia [25].

4.3. Digestato

El digestato corresponde al efluente estabilizado que se obtiene como resultado de la actividad de los microorganismos anaeróbicos [26]. Dependiendo de la carga usada y el proceso seguido por los microorganismos, el digestato puede presentarse de forma líquida o sólida [27], siendo llamado sobrenadante o lodo respectivamente.

La composición del digestato depende directamente de la biomasa utilizada y, en gran medida, de la tecnología seleccionada; sin embargo, los principales elementos presentes son el nitrógeno, el fósforo y el potasio [28]. Dependiendo de estos factores, el desecho generado puede contener elementos esenciales para plantas vivas y, debido a que los efectos ambientales de la disposición del digestato son considerablemente menores que la materia prima original [29], puede ser usado como fertilizante, ser dejado en un vertedero, ser incinerado, o ser enviado a una planta de tratamiento de agua para remover la materia orgánica y el amoniaco [30].

4.4. Biodigestión

Corresponde a una serie de procesos biológicos, en donde la materia orgánica es degradada por un conjunto de microorganismos que son sensibles o que son completamente inhibidas por el oxígeno [31]. Como resultado de la descomposición se obtiene una mezcla de CH_4 y CO_2, llamada biogás y un efluente, el cual puede ser sólido o líquido; llamado digestato [32].

Este proceso ocurre de manera natural en agua fresca, sedimentos marinos, suelos inundados y vertederos. También puede ocurrir en operaciones de tratamientos de residuos industriales y municipales [33]. Es posible generar sistemas de ingeniería donde el proceso ocurra de manera controlada y en un espacio acotado, con el objetivo de recuperar los productos del proceso, llamado biodigestor [34].

El proceso se compone de una serie de metabolismos microbiales complejos, que se pueden dividir en 4 etapas, cada una con diferentes reacciones bioquímicas, a partir de distintos sustratos y microorganismos [35]. Estas 4 etapas toman lugar de manera simultánea, sin embargo, cada uno de los procesos depende de los otros; ya que los productos de uno son la materia prima del siguiente, generando una biocoenosis [36]. La velocidad de este proceso está limitada por la velocidad de la etapa más lenta [37].

4.4.1. Etapas del Proceso

A continuación, se realiza una breve descripción de cada parte del proceso de biodigestión, esquematizado en la Figura 4.1.

Hidrólisis

Consiste en la solubilización de los sólidos. En esta parte las partículas y moléculas complejas de la materia prima, como los carbohidratos, proteínas y lípidos, son disminuidas a compuestos orgánicos más simples, como aminoácidos, azúcares simples y ácidos grasos de cadena larga [39, 40]. Además, se generan péptidos, pequeñas cantidades de ácido acético, hidrógeno molecular y dióxido de carbono [41].

Dado el tamaño de estos compuestos, no pueden atravesar la pared celular, por lo que el proceso ocurre debido a la acción de enzimas extracelulares secretadas por las células; las cuales rompen las macromoléculas a unidades pequeñas que pueden atravesar la pared celular [42].

Para los residuos sólidos urbanos, la hidrólisis es un proceso limitante ya que se compone de material lignocelulósico [43]. Por otra parte, al estar compuestos de proteínas y lípidos, se genera una gran cantidad de CH_4 y CO_2, ya que estos componentes se encuentran más reducidos que los carbohidratos [44].

La tasa de hidrólisis se puede aumentar fácilmente al reducir el tamaño de las partículas

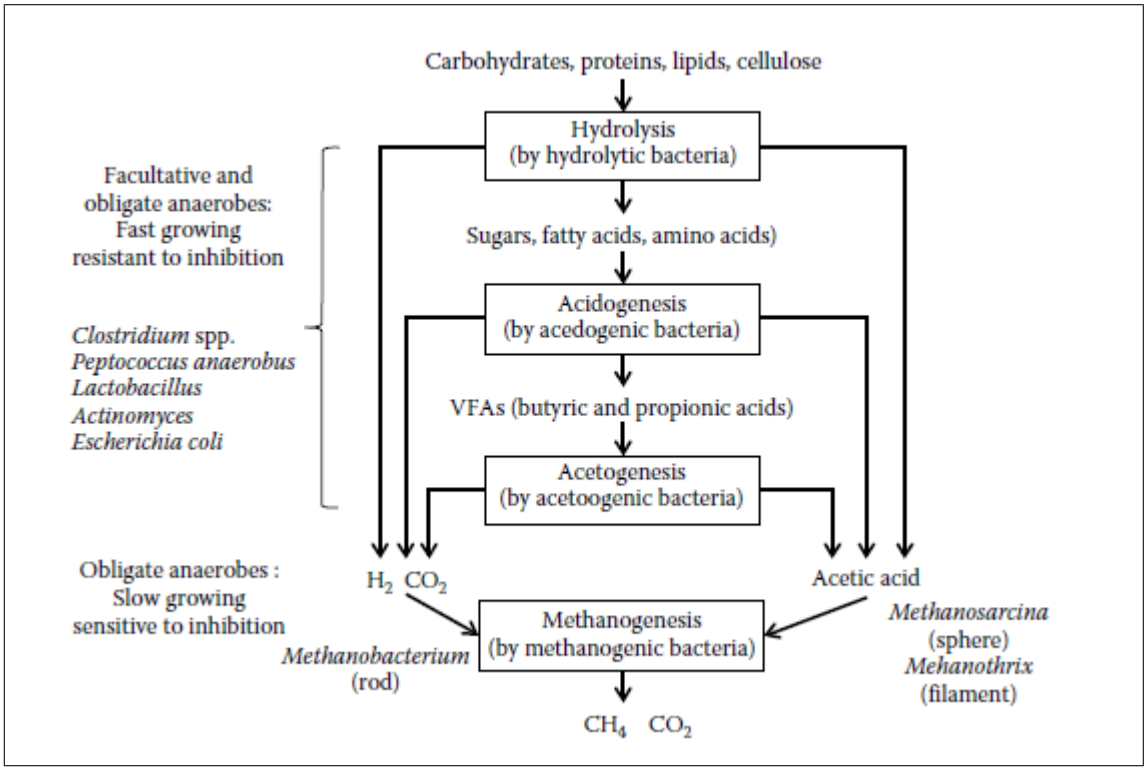


Figura 4.1: Representación Esquemática del Proceso de Digestión [38].

mediante un pretratamiento físico o químico [45].

Acidogénesis

Ocurre la metabolización de los productos de la hidrólisis en el interior celular. Se obtienen ácidos orgánicos, como acetato, propionato, butirato, etc., alcoholes y otros subproductos necesarios, como amoniaco, hidrógeno molecular, dióxido de carbono, etc. En general, se producen ácidos grasos volátiles si la presión de H_2 es alta y CO_2 cuando la presión de H_2 es baja [46].

La importancia de esta etapa no solo recae en producir la materia prima de los procesos posteriores, sino que también elimina cualquier traza de oxígeno disuelto en el sistema, asegurando la condición anaeróbica del proceso [47].

Acetogénesis

Los productos de los procesos anteriores que no pueden ser consumidos directamente por organismos metanogénicos terminan de degradarse aquí [48]. En esta etapa se generan los precursores del biogás: ácido acético, hidrógeno molecular y dióxido de carbono [49].

El mecanismo de transformación puede ser por deshidrogenación acetogénica, que genera acetato desde ácidos grasos y alcoholes o por hidrogenación acetogénica, donde los microor-

ganismos sintetizan acetato a partir de H_2 y CO_2 [50]. En caso de elevarse la concentración de hidrógeno, por motivos energéticos se inhibe la acetogénesis, acumulando productos de los procesos anteriores y frenando la producción de metano [51].

Metanogénesis

Finalmente, el metano es producido por microorganismos metanogénicos anaeróbicos estrictos [52]. La ruta metabólica de los microorganismos depende de la naturaleza del sustrato, pero aproximadamente un 70 % de ésta ocurre a partir de acetato, mientras que un 30 % restante se realiza via H_2 y CO_2. En caso de ocurrir acumulación de H_2, los microorganismos prefieren esta ruta metabólica [53].

4.4.2. Parámetros

El proceso de biodigestión se ve afectado por diversas variables, tanto de estado como de operación, tales como: la temperatura, el pH, sustancias inhibidoras, composición del sustrato, etc. Además, cada grupo microbiano que forma parte del proceso de digestión presenta sus propias condiciones óptimas de crecimiento, sin embargo, es necesario equilibrarlas para lograr que todos los grupos de microorganismos puedan coexistir [54].

En el siguiente apartado, se realiza una pequeña reseña sobre los principales parámetros que afectan el proceso de biodigestión a nivel industrial.

Temperatura

La temperatura es uno de los factores más importantes en el desarrollo del proceso de biodigestión. Los microorganismos anaeróbicos pueden desarrollarse en un rango de temperaturas entre -5 a $80°C$ dependiendo del grupo metabólico con el cual se trabaje, sin embargo, requieren menor energía para trabajar a mayor temperatura, lo que significa un proceso más rápido mientras el parámetro aumenta [55]. Pese a lo anterior, temperaturas muy altas pueden causar una degradación de enzimas esenciales para la vida celular, disminuyendo el ritmo metabólico y coartando la producción de biogás [56].

En general, se ha demostrado que los límites de temperatura son fluidos y que los cambios bruscos de temperatura son los que causan daño a los microorganismos, mientras que cambios lentos permiten que éstos sean capaces de adaptarse [57]. Una disminución de la temperatura provoca un descenso en la actividad microbiana, aumentando la relación carga orgánica/actividad microbiana, pudiendo bloquear todas las etapas del proceso; mientras que un aumento brusco de la temperatura disminuye la velocidad de crecimiento, pudiendo provocar un fallo en el sistema [58].

Aumentar la temperatura implica una mejora en la velocidad de crecimiento de los microorganismos, sin embargo, en la práctica se traduce también en un aumento de la inestabilidad

del sistema, haciéndolo más sensible a los cambios de temperatura y se requiere un mayor gasto energético para mantener el proceso [59]. A nivel industrial, el calor generado en el aprovechamiento del recurso se usa para calentar el sistema, obteniéndose un balance positivo en términos energéticos; sin embargo, no existe un acuerdo de si el aumento de la temperatura de operación del proceso compensa el coste de alcanzar y mantener esas condiciones, por lo que es necesario realizar un estudio económico para cada caso en particular [60].

Cada tipo de microorganismo tiene su propio óptimo de temperatura donde la metabolización es máxima, sin embargo, existen óptimos globales para distintos grupos de microorganismos [61], identificándose tres rangos: psicrofílico (entre 0 a 25°C), mesofílico (entre 25 a 40°C) y termofílico (entre 40 a 60°C). En la Figura 4.2 se ve de manera esquemática el crecimiento de los microorganismos en función de la temperatura.

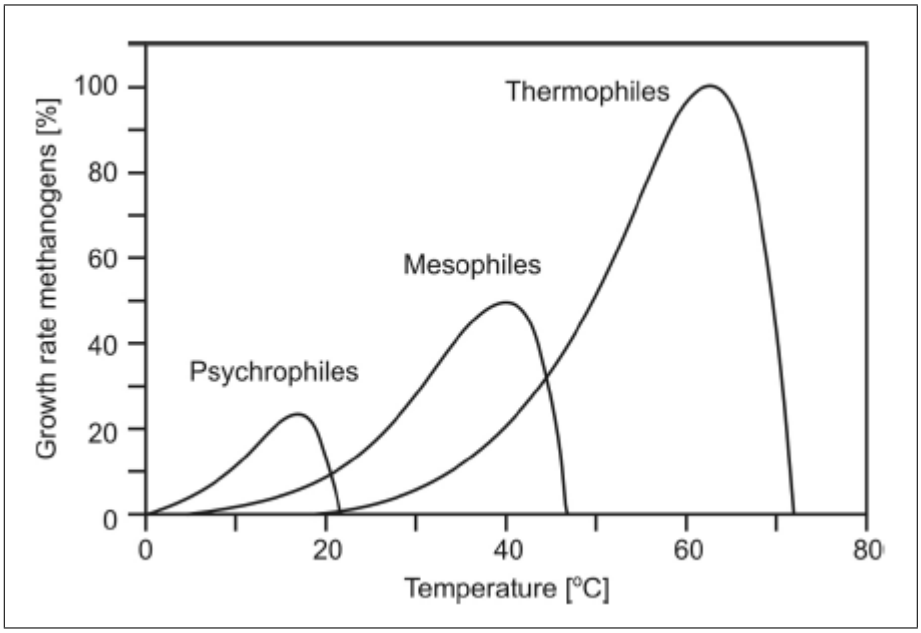


Figura 4.2: Crecimiento de Microorganismos en Función de la Temperatura [62].

Los microorganismos psicrofílicos se usan en áreas tropicales, a temperatura ambiente y sin calentamiento. La generación de productos de las 4 partes del proceso es pequeña, debido a la baja actividad microbiana. Requieren un alto tiempo de residencia o un gran volumen para generar una degradación eficiente [63]. No se tienen antecedentes de operaciones económicamente rentables de plantas de biogás a este rango de temperatura [64].

El rango mesofílico es el proceso más común usado para los procesos relacionados a residuos industriales y municipales. Su alta popularidad se debe a que son fáciles de poner en marcha, tienen un rendimiento estable y una actividad relativamente alta [65], además de contar con una buena estabilidad del proceso [66].

Los microorganismos termofílicos crecen bien a elevadas temperaturas. Su actividad es alta, por lo que tienen una gran tasa de generación de gas, sin embargo, son extremadamente inestables y sensibles a perturbaciones y a cambios de temperatura. Una ventaja de estos microorganismos es que tienen la habilidad de destruir las bacterias patogénicas y virus debido a la combinación de un ambiente anaeróbico y altas temperaturas [67].

pH

Es otro de los factores importantes en el funcionamiento de un biodigestor, ya que tanto los microorganismos metanogénicos como los acetogénicos son muy sensibles al cambio de éste, provocando una disminución en la reproducción y en la actividad [68]. El pH se estabiliza mediante la misma actividad coordinada del conjunto de microorganismos entre 7,2 y 7,5 para condiciones mesofílicas y entre 7,5 y 8 en condiciones termofílicas [69], sin embargo, en caso de la inhibición de alguna de las etapas del proceso, los productos ácidos se pueden acumular; cambiando las condiciones de pH. El mismo resultado se puede tener si se alimenta mucha materia orgánica en muy poco tiempo [70].

En caso de cambios en el pH, los microorganismos acetogénicos y metanogénicos pueden frenar su metabolismo, acidificando el medio. Este fenómeno es común en estados iniciales de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, siendo más evidente en el rango termofílico que en el mesofílico, debido al incremento de microorganismos por la temperatura [71]. Estos cambios en el pH se pueden combatir añadiendo distintos productos químicos, como bicarbonato de sodio y potasio, carbonato de calcio, etc [72].

En la Tabla 4.4 se presentan los rangos de pH donde la actividad microbiana es óptima:

Tabla 4.4: pH Para Cada Etapa del Proceso [73].

Etapa	**pH**
Hidrólisis	7,2-7,4
Acidogénesis	7,2-7,4
Acetogénesis	7,0-7,2
Metanogénesis	6,5-7,5

Inhibidores

Un indicio de inhibición a la digestión anaeróbica es usualmente un decrecimiento o una detención completa en la producción de metano. Existen compuestos químicos que disminuyen la tasa de generación de biogás o incluso generan la falla de la reacción a ciertas concentraciones. Un compuesto químico puede ser considerado inhibitorio cuando detiene el crecimiento de los microorganismos o genera un cambio adverso en la población de éstos [74].

Para que un compuesto sea biológicamente tóxico, debe encontrarse solubilizado y en una concentración que sea tóxica [75]. Como inhibidor se tiene el H_2 en altas concentraciones, debido al cambio de proceso de la reacción, donde el hidrógeno, en vez de ser transformado en metano, reacciona con el ácido acético y el dióxido de carbono para formar ácido propiónico. El amoniaco, producto de la degradación de proteínas y urea, inhibe a los microorganismos metanogénicos, mientras que el sulfuro o sulfato, subproducto de la producción de biogás, también inhibe el proceso. La presencia de metales en grandes cantidades puede producir la

deshidratación de las células [76]. Otro inhibidor importante es el oxígeno molecular, el cual puede recuperarse fácilmente cuando el O_2 es eliminado por desplazamiento o por acción de organismos facultativos. Otros elementos inhibidores pueden ser el nitrógeno amoniacal, ácidos grasos de cadena larga, ácido propiónico, butírico e isobutírico en concentraciones elevadas [77].

Composición del Sustrato

La biodigestión va a depender, en términos elementales, del carbono y nitrógeno del sustrato, además de sales minerales que actúan como nutrientes; como el azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, etc. La composición del sustrato es fundamental para la calidad y la cantidad de biogás producido [78].

Para que una biodigestión funcione correctamente, es necesario una relación de carbono/-nitrógeno de 30:1 o de 20:1. El primero para la energía de los microorganismos y el segundo para la producción de nuevas células. En caso de tener una relación C/N muy grande, los microorganismos no se reproducen, mientras que si es muy chica, el proceso se inhibe debido a la formación de amonio [79].

Tiempo de Retención Hidráulica

El tiempo de retención hidráulica (TRH) es el tiempo promedio que una sustancia reside en el reactor. Al aumentar el TRH aumenta el grado de la materia orgánica degradada y, por ende, la producción de metano [80]. Éste va a depender del tipo de materia prima, la temperatura de operación, las etapas del proceso y la configuración de los digestores.

El TRH va de la mano con la temperatura, ya que al aumentar ésta, la acción de los microorganismos se ve acelerada, requiriendo menos tiempo para digerir la misma cantidad de materia. Es por esto que los procesos mesofílicos tienen TRH más elevados que los procesos termofílicos. El grado de mezcla también influye en el TRH al aumentar la superficie de contacto con la materia.

El tiempo de retención hidráulica se define según la siguiente ecuación:

$$TRH[\mathrm{dia}s] = \frac{Volumen\ \mathrm{de}\ operacion[m^3]}{Volumen\ \mathrm{de}\ carga[m^3/\mathrm{dia}]}$$

Velocidad de Carga Orgánica

La velocidad de carga orgánica (VCO) representa la cantidad de materia orgánica que es entregada al sistema en una alimentación de flujo continuo. Se entiende como el esfuerzo que se le impone a los microorganismos presentes en el sistema al alimentarlos con material orgánico [81].

Si la velocidad de carga orgánica es muy alta, los microorgnismos no permanecen suficiente tiempo en contacto con el sustrato y, por ende, no degradan toda la materia. Además, una sobrecarga repentina genera un aumento en la hidrólisis, generando una mayor concentración de CO_2 y H_2, afectando el proceso completo. En caso de que sea muy baja, significa que se esta ingresando muy poco material orgánico, y por ende, la producción de biogás disminuye ya que se tiene materia prima solo para mantener el metabolismo basal de los microorganismos [82, 83].

La *Guía de Biogás* generada por el ministerio de agricultura alemán define la VCO como [84]:

$$VCO\left[\frac{kgVS}{m^3\mathrm{dia}}\right] = \frac{\dot{m}\cdot c}{V_r\cdot 100}$$

Con:

$\dot{m}$ = flujo másico $[kg/\mathrm{dia}]$.
c = concentración de la materia orgánica $[\,\%ST]$.
V_r = volumen del reactor $[m^3]$.

4.4.3. Cinética

La cinética corresponde al ratio de una reacción. En el caso de la biodigestión, hay distintas formas de modelar el proceso, sin embargo, no existe un método estadístico lo suficientemente robusto para calcular detalladamente la producción de biogás con precisión. La cantidad de gas, y el tiempo que se demora en ser producido, depende de todos los parámetros mencionados y más, por lo que para determinarlo, es necesario hacer un test de digestión [85].

Cendales [86] describe la cinética anaeróbica en las siguientes fases:

i. Fase latente:

   Corresponde a la adaptación de los microorganismos al ambiente. El crecimiento neto se considera nulo, ya que el balance entre los microorganismos que se reproducen se contrarresta con la pérdida de los que mueren adaptándose al sistema.

ii. Fase exponencial:

   Los microorganismos se reproducen a gran velocidad, dependiendo de la capacidad de asimilación de éstos al sustrato.

iii. Fase estacionaria:

   Corresponde a la fase de estabilización de la población microbiana debido al incremento de compuestos que inhiben la reproducción o la disminución del sustrato.

iv. Fase exponencial de muerte:

   Se presenta una disminución acelerada de la población microbiana, debido al exceso de sustancias inhibidoras o la falta de nutrientes.

4.5. Biodigestor

Un biodigestor anaeróbico, en términos conceptuales, corresponde a un reactor dentro del cual se deposita material orgánico, y mediante un proceso de descomposición y fermentación anaeróbica, se produce biogás y un residuo estabilizado [87]. Consta de un depósito hermético donde se introducen los residuos orgánicos, mezclados con agua, para ser digeridos por los microorganismos correspondientes [88].

Las primeras experiencias registradas se encuentran en Francia, en 1860, a partir de una fosa de sedimentación y en Alemania, en 1925, se construyó un digestor calentado. Pese a que a lo largo del s. XX la tecnología se desarrolló, no fue hasta la década de los 70, producto de la crisis del petróleo, en que se popularizó como fuente de energía. Como resultado, se construyeron digestores mesofílicos industriales y rurales en Europa y E.E.U.U. para la generación de biogás a partir de residuos orgánicos municipales, agrícolas e industriales con el fin de obtener energía eléctrica y calórica. En años recientes, la creación de biodigestores ha obtenido atención en el mundo entero como fuente de energía renovable debido a la tendencia a la sustentabilidad y las preocupaciones surgidas por el abuso de combustibles fósiles. Más de 4000 plantas de biogás se encontraban en operación a fines del año 2005 [89].

Consideraciones importantes que deben ser hechas para la construcción de un biodigestor son que la materia prima debe ser accesible, tanto la biomasa utilizada como el agua requerida. Así mismo, el biogás debe ser utilizado en un lugar cercano a su generación.

Hoy en día, no existe una clasificación general de biodigestores, ya que la tecnología aún no se encuentra madura, sin embargo, se ha avanzado a la construcción de digestores con sistemas de ingeniería sofisticados especiales para el tratamiento de distintos tipos de materia orgánica, como por ejemplo aguas residuales, residuos sólidos municipales, purines de animales, etc [90].

Debido a lo explicado anteriormente, y sumado a la gran cantidad de tecnologías distintas, no existen clasificaciones absolutas o reglas de diseño transversalmente aceptadas para el diseño y construcción de biodigestores. Cada empresa parece usar sus propias reglas y criterios de diseño, sin embargo, se identifican a lo menos tres factores distintos para clasificar los biodigestores, detalladas a continuación [91].

4.5.1. Clasificación

Alimentación

El parámetro de alimentación hace referencia a la forma en que el sustrato es ingresado al digestor, ésta puede ser continua o discontinua. En la alimentación continua, el sustrato y el digestato son ingresados y retirados respectivamente de manera continua al digestor, mientras que en la alimentación discontinua, el digestor es llenado una vez con sustrato, se cierra durante el TRH, y una vez realizado el proceso se abre, se vacía el efluente, y se inicia el proceso nuevamente [92]. Como variable del proceso continuo, se tiene el proceso semi

continuo, donde el sustrato es agregado, a lo menos, una vez por día de trabajo [93].

Pese a que los sistemas discontinuos son baratos, rápidos y simples, tienen una gran fluctuación en la producción de gas y su calidad. Además, existe una pérdida de gas en el vaciado del equipo. Por otra parte, los sistemas continuos son más caros, sin embargo, la producción de biogás es más estable y por ende, son equipos más confiables [94].

Concentración de Sólidos

La concentración de sólidos se expresa en el porcentaje de humedad de la mezcla digerida, separando los digestores en húmedos y secos. No existe una definición precisa sobre esta diferencia, sin embargo, en la práctica se habla de un proceso húmedo con un porcentaje de sólidos totales de entre un 4 % a un 10 %, mientras que un proceso seco va desde un 20 % a un 35 % [95]. Estas diferencias se hacen en base a la posibilidad de bombear el contenido del digestor, donde superando el 15-16 % el contenido ya no es bombeable y se empieza a hablar de un sistema semi seco o seco [96]. La concentración de sólidos totales puede modificarse al agregar agua para alcanzar el porcentaje deseado.

Las ventajas de los sistemas húmedos es que las sustancias inhibidoras son diluidas y se requieren equipos mecánicos menos sofisticados. Como desventaja se tiene que requieren un pretratamiento de la materia prima y tienen un mayor consumo energético para calentamiento [97]. Los sistemas secos no permiten una dilución de las sustancias inhibidoras, ya que funcionan como un pistón y no como una mezcla completa, sin embargo, son más baratos de operar al no necesitarse un pretratamiento sofisticado [98].

Etapas

El proceso de biodigestión se puede realizar en una etapa, donde la degradación completa se realiza en un solo reactor, o en múltiples etapas, donde las distintas partes del proceso se realizan en reactores distintos. En el primer caso, se establece un equilibrio químico entre velocidades metabólicas de distintos grupos microbianos, mientras que en el segundo se pueden otorgar condiciones óptimas de operación para cada parte del proceso [99, 100].

Generalmente, en caso de ser multi etapa, se tiene una primera etapa donde ocurre la hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis, y una segunda etapa donde ocurre la metanogénesis. Este proceso tiene como ventaja que se puede obtener una producción de metano y reducción de sólidos similar, pero en menor tiempo, además, muchos inhibidores de la metanogénesis son eliminados en la primera etapa. Son más estables biológicamente hablando, pero tienen un costo de construcción y de operación mayor. En los sistemas mono etapa los procesos microbianos ocurren en las mismas condiciones de operación, generando más fallas que los multietapa, sin embargo, son considerablemente más baratos de construir y mantener [101].

4.5.2. Experiencias

En los últimos años, las experiencias de biodigestores se han multiplicado a lo largo del mundo, generándose diversos procesos en el mercado, tanto de baja como de alta tecnología. Los diseños de alta tecnología incluyen soluciones que aumentan la productividad, sin embargo, los hacen más complejos y caros. Por otra parte, los diseños de baja tecnología, pese a su poca eficiencia, son baratos y asequibles a un mayor número de usuarios.

A continuación, se realiza una síntesis de algunos procesos de biodigestión descritos por Nayono en su tesis doctoral [102] y Díaz en su tesis de master [103]:

i. **Biocel**: Consta de un sistema discontinuo, de vía seca al 30-40 % ST, que opera normalmente en condiciones mesofílicas. Su disposición corresponde a uno o varios reactores rectangulares que cuentan con recirculación del lixiviado generado, el cual es mezclado con la biomasa nueva. Posee un TRH de aproximadamente 15 a 21 días. Hay registros de producción de biogás de aproximadamente 90 $[kg/Ton_{Residuo}]$.

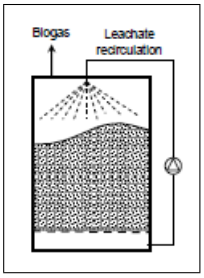


Figura 4.3: Esquema Sistema Biocel [72].

ii. **Dranco**: Es un sistema continuo, de vía seca, mono etapa que opera en condiciones termofílicas. Consta de un reactor que opera en flujo pistón, sin agitación más allá del mismo flujo pistón. Posee recirculación al agregar la materia extraída con el nuevo sustrato. Posee un TRH de 15 a 30 días. Genera entre 100 a 200 $[m^3/Ton]$.

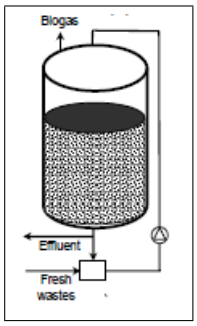


Figura 4.4: Esquema Sistema Dranco [72].

iii. **Valorga**: Es un sistema mono etapa, de vía seca, en alimentación continua. Consta de un reactor cilíndrico vertical operable tanto en rango mesofílico como termofílico. Cuenta con sistema de recirculación de biogás que mezcla verticalmente. Tiene un TRH de 18 a 25 días y una generación de 80 a 160 $[m^3/Ton]$ en el rango mesofílico. Si el

sistema es muy húmedo, puede fallar el reactor debido a la obstrucción de los inyectores de gas.

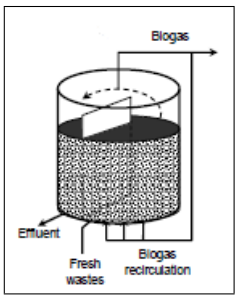


Figura 4.5: Esquema Sistema Valorga [72].

iv. **Kompogas**: Es un sistema de una etapa, con flujo continuo en fase seca, con concentración de ST entre 23 % y 28 % que opera en el rango termofílico. Posee un sistema de pistón horizontal impulsado por agitadores rotatorios. Tiene tasas de generación de aproximadamente 820 $[m^3/Ton_{VS}]$.

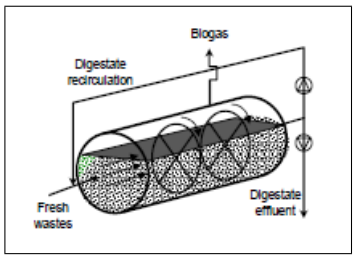


Figura 4.6: Esquema Sistema Kompogas [72].

v. **BTA**: Es un proceso continuo con bajo nivel de ST, cercano al 10 %. Existen experiencias de múltiples etapas y mono etapas, estas últimas aplicadas en sistemas pequeños. Opera generalmente en el rango mesofílico. Requiere un pre tratamiento hidromecánico para luego ser digerido de manera anaeróbica. Posee tasas de generación de biogás entre 80 a 120 $[m^3/Ton]$.

vi. **Schwarting-Uhde**: Es un sistema de dos etapas, una mesofílica y otra termofílica. Es un proceso húmedo, que opera en flujo de pistón mediante el bombeo de biogás desde placas temperadas en el fondo del reactor. Posee un TRH de 5 a 6 días, lo que hace que tenga un TRH global de entre 10 a 12 días. Dado el mecanismo de bombeo en ambas direcciones, tiene tendencia a taparse.

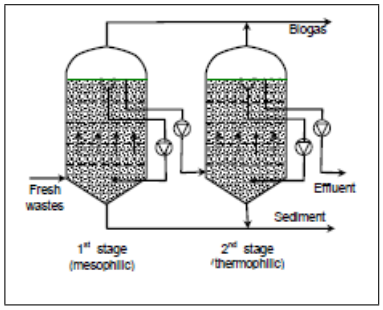


Figura 4.7: Esquema sistema Schwarting-Uhde[72].

vii. **Linde BRV**: Corresponde a un proceso continuo, de dos etapas en vía seca. Opera en el rango termofílico. Se compone de una etapa de hidrólisis que dura 2 días, para luego trasladarse al reactor rectangular. Posee un sistema de mezclado de palas transversales. El TRH global es de 21 a 25 días.

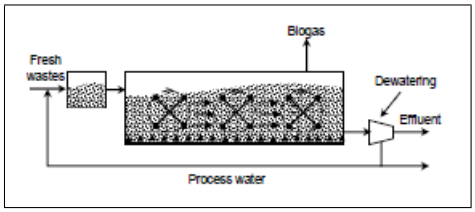


Figura 4.8: Esquema Sistema Linde BRV [73].

Capítulo 5

Procedimiento

5.1. Caracterización de Materia Prima

La recopilación de antecedentes de la materia prima se lleva a cabo en base al Estudio Caracterización de Residuos Sólidos Domiciliarios en la Región Metropolitana, realizado por la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, ordenado por la Comisión Nacional de Medio Ambiente el año 2006 [104].

Para la composición del estudio se consideran tres variables importantes que modifican la composición de los residuos sólidos municipales, los cuales son la variación estacional, factores sociales y factores económicos. A continuación, se hace una pequeña revisión de éstos.

i. Factores Estacionales: Dependiendo de la estación, los elementos que forman parte de la alimentación de las personas varían, producto de una entrada o salida de ciertos vegetales del mercado. Durante la temporada estival, la oferta de frutas y verduras aumenta, y por ende también lo hace su consumo, generando un alza en la fracción orgánica de los residuos. Por otra parte, en los meses invernales aumenta el consumo de alimentos envasados, provocándose una disminución en los restos orgánicos y un aumento en el desecho de envases.

ii. Factores Sociales: Dada las diferencias sociales presentes en el país, se puede hacer una división en distintos sectores, teniendo cada uno de ellos estilos de vida que no coinciden del todo. Lo anterior provoca que su perfil de consumo sea distinto, y por ende, un perfil de residuos distinto.

iii. Factores Económicos: El nivel de importancia de este factor es alto, ya que determina tanto la ubicación geográfica en la cual viven las personas y su nivel o calidad de vida. Es uno de los factores que más influye en el tipo de basura recolectado, siendo visible, por ejemplo, en el mayor consumo de productos envasados en los estratos altos.

5.1.1. Diseño del Muestreo

Para el diseño de muestreo, se consideró que el estudio permitiera la estratificación y el muestreo representativo de las comunas que fueron seleccionadas en la región metropolitana. Se consideró los periodos de invierno y primavera del 2006, sin embargo, mediante extrapolaciones, se obtuvieron datos para los periodos faltantes.

Identificación de Niveles Socioeconómicos

Para realizar la identificación, se utilizó el método de calificación socioeconómica ESOMAR (Asociación Europea de Investigación de Mercado), ya que es ampliamente utilizado en investigaciones de todo tipo en los países de América Latina.

Para obtener la información de los niveles socioeconómicos de la región metropolitana, se utilizan los datos de ICCOM (Investigación de mercado), basada en el Censo 2002- Casen. Esta última se desarrolla en base a dos variables, el equipamiento de bienes en el hogar, lo que responde a una variable económica, y el nivel educacional del jefe de hogar, que responde a una variable social. La Tabla 5.1 muestra la comparación de estos dos métodos de clasificación.

Tabla 5.1: Equivalencia Clasificación Esomar y Casen.

Clasificación Esomar	**Grupo Equivalente Casen**
A=Muy Alto B=Alto	ABC1
Ca=Medio-Alto	C2
Cb=Medio	C3
D=Medio-Bajo	D
E=Muy Bajo	E

Una vez identificados los grupos socioeconómicos (GSE), se realiza un análisis para la elección de las comunas más representativas para cada GSE, siendo éstas las estudiadas, y realizándose una extrapolación de los resultados para las comunas de más características.

Distribución de la Población por Estrato Socioeconómico

Para realizar el análisis de la distribución de la población por estrato socioeconómico, se cuenta con la información descrita por cada comuna en función de la cantidad de población y de número de hogares.

A partir de esta información, se genera un listado ordenando el porcentaje de representatividad de cada GSE por comuna de manera descendente. En otras palabras, para cada GSE,

se hace un cociente entre la cantidad de viviendas de aquel GSE en la comuna y la cantidad de viviendas de este mismo en el Gran Santiago, ordenándose de mayor a menor.

Dado que el grupo socioeconómico E no presenta un nivel significativo en ninguna comuna de la ciudad, la información se complementa con otras comunas de la Región Metropolitana, encontrándose a Alhué como la única con una representatividad considerable del grupo socioeconómico E. Solo se agrega ésta para poder complementar el estudio.

Una vez definidas las comunas con predominancia de cada GSE, se determina cuales de éstas son más puramente representativas de aquel grupo, permitiendo decir que los sectores seleccionados se caracterizan por estar inscritos en una macrozona residencial de alta densidad habitacional con predominancia del GSE estudiado. Para esto, se hace un nuevo listado, separado por GSE, donde cada una de las comunas encontradas anteriormente son ordenadas por la cantidad de hogares de ese mismo GSE en comparación con los hogares totales de la comuna.

Finalmente, según los datos utilizados por el estudio, se seleccionan las comunas mostradas en la Tabla 5.2 para el estudio.

Tabla 5.2: Comunas de Mayor Representatividad Según GSE.

Grupo Socioeconómico	**Comuna de Mayor Representatividad**
ABC1	Vitacura Providencia
C2	Santiago La Florida
C3	Quinta Normal Estación Central Puente Alto
D	La Pintana San Ramon Peñalolén
E	Alhué

Tipo de Muestreo

La selección de muestras se realiza mediante un muestreo de tipo aleatorio estratificado.

Un muestreo aleatorio estratificado, la población total N es dividida en subpolaciones de N_{i} elementos. Las poblaciones no se sobreponen y juntas forman la totalidad de la población, es decir, como se puede ver en la ecuación:

$$\sum N_{\mathrm{i}} = N$$

Para el caso de estudio, las subpolaciones corresponden a cada GSE. Conocidos los valores de N_{i}, se seleccionan las muestras de manera independiente en cada subpoblación. Los tamaños de muestra tomado en cada grupo son representados por n_{i} respectivamente.

En la Figura 5.1 se realiza una representación esquemática.

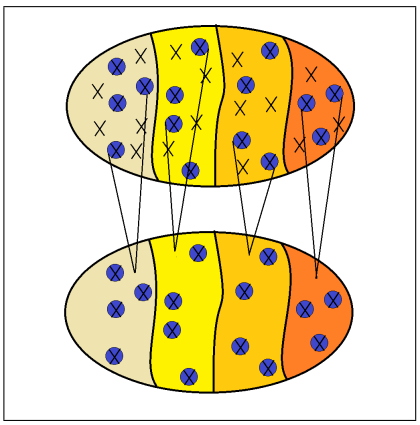


Figura 5.1: Representación Muestreo (Elaboración Propia).

Por lo tanto, dentro de las comunas seleccionadas como las más representativas de cada GSE, se eligieron aleatoriamente los sectores a muestrear. Estos puntos se analizaron durante los distintos días de recolección asignados. Es decir, si una zona tuvo frecuencia 3 (lunes, miércoles y viernes), se tomaron 3 muestras de este sector. En caso de que la frecuencia haya sido mayor, se tomaron al menos 3 muestras del sector.

Número de Muestras

El número de muestras necesarias para tener el nivel de confianza deseado están en función de la constitución de los residuos sólidos, con el fin de que las muestras sean representativas de la totalidad del flujo. Se utiliza la ecuación propuesta por ASTM, Draft Number 2, October 21, 1988, "Method for Determnation of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste".

Dado que cada fracción de los residuos tiene su propia desviación estándar y media, se calcula el número de muestras para cada tipo de componente. Se selecciona la cantidad de muestras dictada por aquel que requiere la mayor cantidad para la precisión deseada, procurando así que el componente con mayor desviación estándar tenga el nivel de precisión deseado.

Finalmente, la cantidad de muestras para una confiabilidad del 90 % y un 5 % de precisión es de 195. Por limitantes de tiempo y recursos, el estudio se desarrolló con 162 muestras efectivas.

Determinación de la Cantidad de Muestras

La determinación de la cantidad de muestras se fija según parámetros ampliamente aceptados. El estudio enumera una lista de documentos que aconsejan trabajar con valores entre 90 a 120 $[kg]$.

Toma de Muestras

Para poder cuantificar el margen de basura recuperado que el estudio no puede obtener, se considera una comparación entre lo recogido y lo llevado a rellenos sanitarios y vertederos.

En total, se seleccionan 15 muestras para caracterizaciones adicionales, pertenecientes a cada GSE, las cuales son contrastadas con el resto.

Prueba de Composición Física

Para generar la composición física, se homogeneiza la basura y por técnica de cuarteo se selecciona una parte de ésta. Una vez seleccionada una parte, se separan los componentes y se clasifican según categoría. Finalmente, se calcula el porcentaje de los componentes teniendo los datos del peso total y el peso de cada clase.

5.1.2. Resultados Preliminares

Los principales resultados del estudio, utilizados para la estimación de basura generada y por ende, la producción de biogás, se presentan de manera desagregada en la Tabla 5.3 y de manera resumida en la Tabla 5.4.

5.1.3. Conclusiones Preliminares

Adaptando los resultados del estudio de basura a los objetivos del presente trabajo, en la Tabla 5.5 se presenta la FORSM producida per cápita promedio desagregada por estrato socioeconómico.

Para esto se consideran los resultados de las tablas presentadas en la sección *5.2.3 Resultados* del estudio realizado por la PUCV. Como FORSM se considera la adición de la sección *Residuos de Alimentos y la sección Residuos de Jardín Poda.*

Tabla 5.3: Composición Resultante de RSD, Provincia de Gran Santiago, Según GSE y Categorías de Primer Orden, Sector Residencial [Adaptado].

Componentes Principales	**% en peso promedio**					
	ABC1	**C2**	**C3**	**D**	**E**	**Promedio**
Residuos Alimentos	44,64	46,36	51,89	47,25	55,85	49,20
Residuos Jardin Poda	7,36	5,78	6,81	4,83	0,00	4,96
Papel	15,31	13,48	9,90	8,46	3,73	10,18
Cartón	3,28	6,34	2,24	2,59	2,21	3,33
Plásticos	9,63	10,96	9,39	9,09	11,29	10,07
Tetrapack	1,19	0,99	0,61	0,38	0,32	0,70
Pañales y Celulosas Sanitarias	5,26	3,23	4,17	6,10	5,98	4,95
Gomas	0,20	0,13	0,14	0,06	0,00	0,11
Cueros	0,00	0,01	0,14	0,19	0,00	0,07
Vidrio	5,26	4,75	2,68	2,78	4,23	3,94
Metales	1,23	1,27	1,31	0,99	4,21	1,80
Madera	0,09	0,44	0,61	2,46	0,55	0,83
Textiles	0,73	1,15	3,03	3,96	0,99	1,97
Suciedad y Cenizas	2,25	2,10	2,20	4,73	9,75	4,20
Pilas	0,04	0,03	0,06	0,08	0,05	0,05
Huesos	0,70	0,88	0,63	0,73	0,03	0,59
Cuescos	0,36	0,40	0,29	0,39	0,00	0,29
Cerámicas	0,37	0,40	0,52	0,76	0,00	0,41
Otros	1,69	0,79	2,95	3,67	0,00	1,82
RSE	0,41	0,52	0,43	0,50	0,81	0,53

Tabla 5.4: Resultado Promedio de Producción Per Cápita para cada GSE.

GSE	**PPC promedio [kg/hab/dia]**
ABC1	1,33
C2	1,32
C3	1,22
D	0,90
E	0,67

Tabla 5.5: Producción Per Cápita Promedio de FORSM por GSE [Adaptado].

GSE	**PPC prom.** [kg/hab/dia]	**FORSM** [%]	**PPC prom. FORSM** [kg/hab/dia]
ABC1	1,33	52,00	0,6916
C2	1,32	52,14	0,6882
C3	1,22	58,70	0,7161
D	0,90	52,08	0,4687
E	0,67	55,85	0,3742
Prom.	1,09	54,15	0,5878

5.2. Caracterización del Público Objetivo

La realización del estudio se desarrolla en base a los resultados de la encuesta de caracterización socioeconómica Casen 2017. En particular, se utiliza el módulo Vivienda y Entorno para obtener los resultados de interés.

A partir de los resultados publicados por el Ministerio de Desarrollo Social, es posible tratar los datos para obtener información precisa a nivel país. Para el análisis desagregado a nivel socioeconómico, se estudian las mismas comunas seleccionadas anteriormente en el estudio de caracterización de la basura, extrapolando los resultados a todo el GSE.

El tratamiento de datos se realiza mediante el paquete de software estadístico Stata®. El código generado se adjunta en el Anexo A1. Cabe mencionar que, al tratarse de más de 800 variables, la limpieza de datos puede generar descuadres en los resultados obtenidos, sin embargo, éstos son considerados como errores estadísticos y no les quitan validez a las conclusiones obtenidas.

5.2.1. Análisis Nacional

Análisis General

En el primer análisis, se realiza un conteo de hogares y viviendas. La encuesta Casen realiza una separación entre el grupo familiar, considerado un hogar, y la estructura física que habita éste, considerada una vivienda. Esto quiere decir que existe la posibilidad de tener más de un hogar por vivienda. La Tabla 5.6 muestra el conteo mencionado, indicando la cantidad de observaciones y los resultados generalizados a toda la población.

Tabla 5.6: Cantidad de Hogares y Viviendas.

Variable	**Observaciones**	**Resultados expandidos**
Cantidad de hogares	70.948	5.974.096
Cantidad de viviendas	68.466	5.551.477

Como dato complementario, se obtiene la distribución de viviendas por sitio, mostrado en la Tabla 5.7. Estos datos se obtienen de la pregunta V8 ¿Cuántas viviendas hay en el sitio? Se asume que las respuestas "0" corresponden a 1 vivienda en el sitio, siendo un total de 4.733.365 viviendas que ocupan el sitio de manera exclusiva, correspondiente al 85 % de las viviendas en total.

A nivel nacional, la distribución de hogares por vivienda se muestra en la Tabla 5.8 a partir de la pregunta V28 del cuestionario, ¿Cuántos hogares hay en esta vivienda? Se puede apreciar que el 95 % de las viviendas cuenta con solo un hogar por vivienda.

De la Tabla 5.9 se desprende la distribución de personas por hogar. Más del 80 % de los

Tabla 5.7: Distribución de Viviendas por Sitio.

Viviendas por Sitio	**Frecuencia**	**Porcentaje**
0	938.784	16,91
1	3.794.581	68,35
2	535.278	9,64
≥3	159.170	5,10
Total	5.551.477	100,00

Tabla 5.8: Distribución de Hogares por Vivienda.

Hogares por vivienda	**Cantidad**	**Porcentaje**	**Acumulado**
1	5.307.550	95,61	95,61
2	181.984	3,28	98,88
≥3	61.943	1,11	100,00
Total	5.551.477	100	

hogares son constituidos por 4 personas o menos, sin embargo, se alcanza un acumulado de 97,27 % para hogares de hasta 6 personas. Esta cifra se puede interpretar como una familia constituida por una pareja de padres y 4 hijos.

Tabla 5.9: Distribución de Personas por Hogar.

Personas por Hogar	**Hogares**	**Porcentaje**	**Acumulado**
1	892.413	15,40	15,40
2	1.475.675	25,47	40,87
3	1.363.920	23,54	64,41
4	1.127.375	19,46	83,87
5	555.094	9,58	93,45
6	221.384	3,82	97,27
7	84.958	1,47	98,74
≥8	73.277	1,26	100,00
Total	5.794.096	100	

Análisis Específico

De la Tabla 5.10 se puede ver la cantidad de cada tipo de viviendas, separadas en las variables de interés.

Tabla 5.10: Distribución de Tipos de Vivienda.

Estilo Vivienda	**Cantidad de Viviendas**	**Porcentaje**
Casa	4.568.345	82,2
Departamento	906.316	16,3
Otro	76.816	1,3
Total	5.551.477	100

Y finalmente, de la Tabla 5.11, se puede obtener la distribución de personas que viven por casa.

Tabla 5.11: Distribución de Personas por Casa.

Personas por Casa	**Casas**	**Porcentaje**	**Acumulado**
1	610.788	13,37	13,37
2	1.101.032	24,10	37,47
3	1.088.757	23,83	61,30
4	941.167	20,60	81,91
5	480.486	10,52	92,42
6	199.998	4,38	96,80
7	78.761	1,72	98,53
$\geq$8	67.356	1,48	100,00
Total	4.568.345	100	

Variables de Interés

Dado que el tratamiento de datos se realiza en función del público objetivo, el estudio de las variables de interés que se pueden obtener a partir de la Casen se acota al sector de la población que vive en casa.

A continuación, en la Figura 5.2 y Figura 5.3 se muestran resultados relacionados al acceso al agua de las viviendas chilenas a nivel nacional. La Figura 5.4 muestra la disponibilidad de energía eléctrica en el sitio de la vivienda.

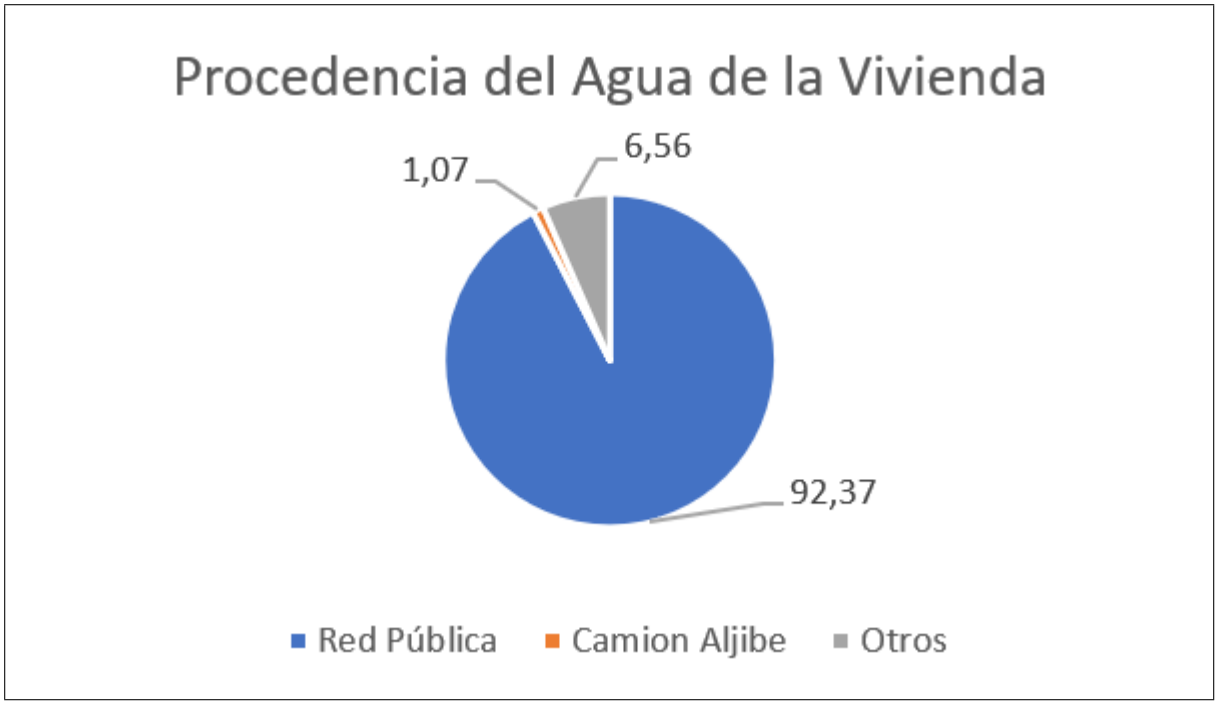


Figura 5.2: Procedencia del Agua.

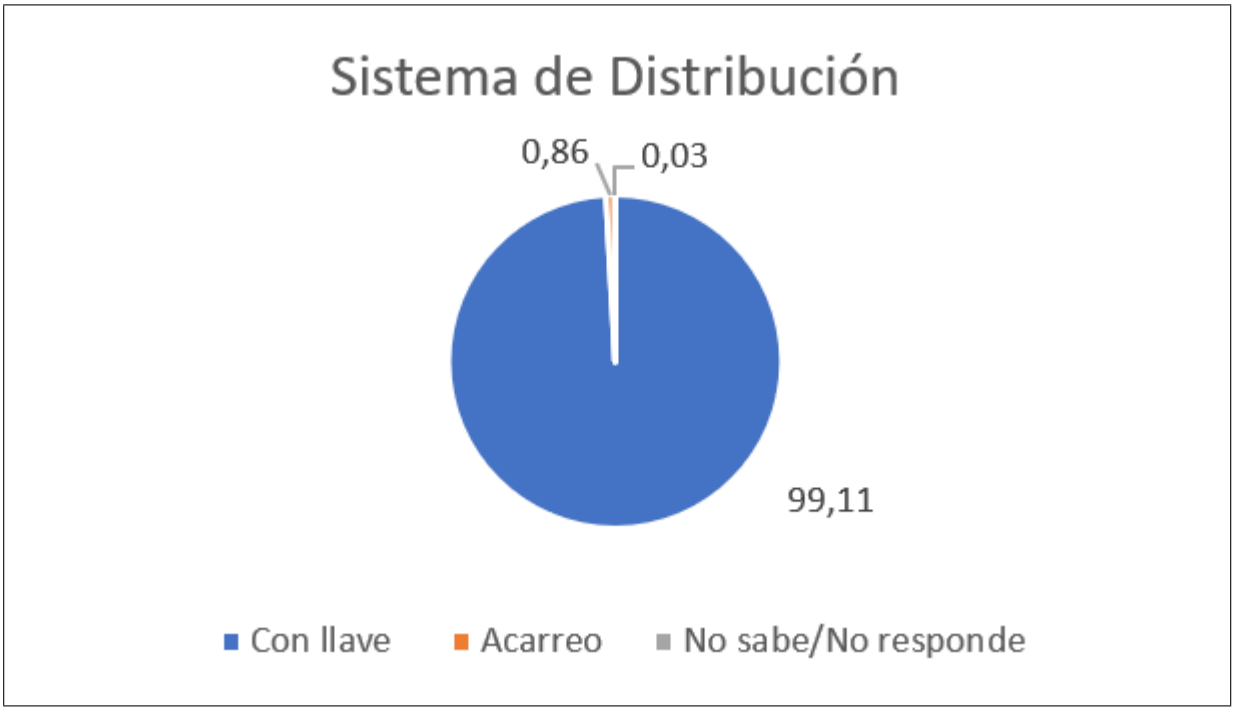


Figura 5.3: Sistema de Distribución.

La Figura 5.5 muestra una comparación de los combustibles usados tanto para cocinar, calefacción y los sistemas de agua caliente de las viviendas.

Finalmente, se presenta en la Figura 5.6 la percepción de las personas sobre la acumulación de basura en las calles.

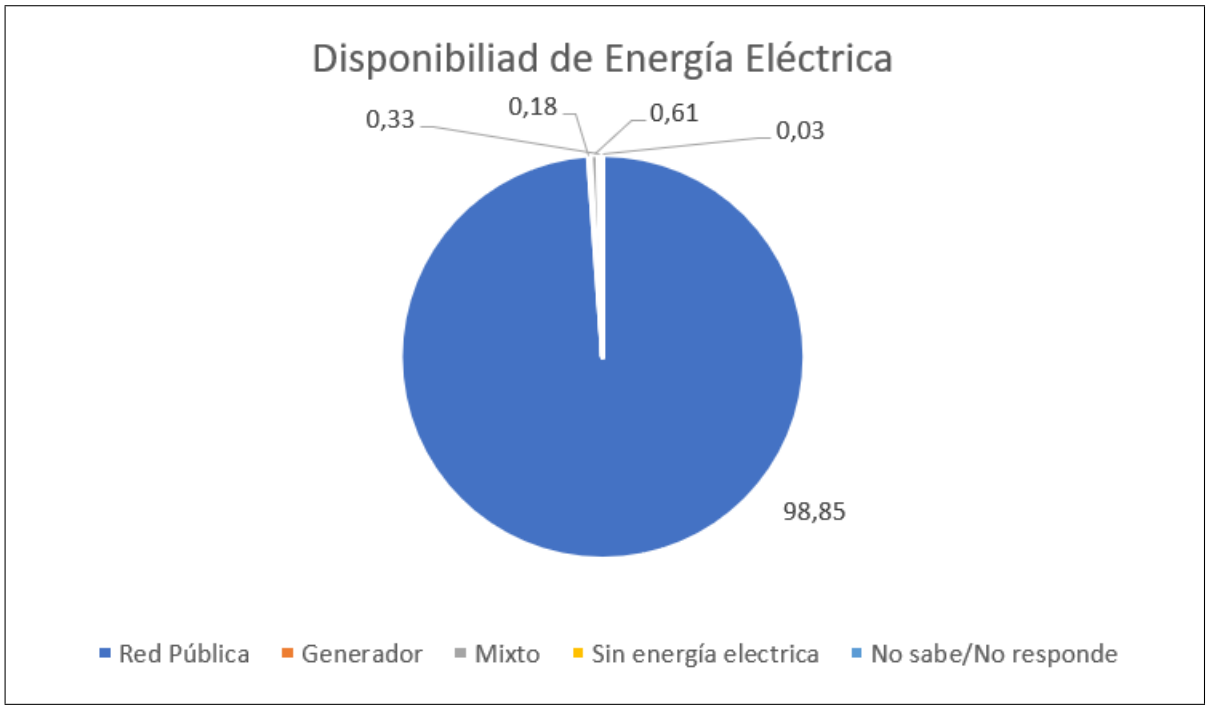


Figura 5.4: Disponibilidad de Energía Eléctrica.

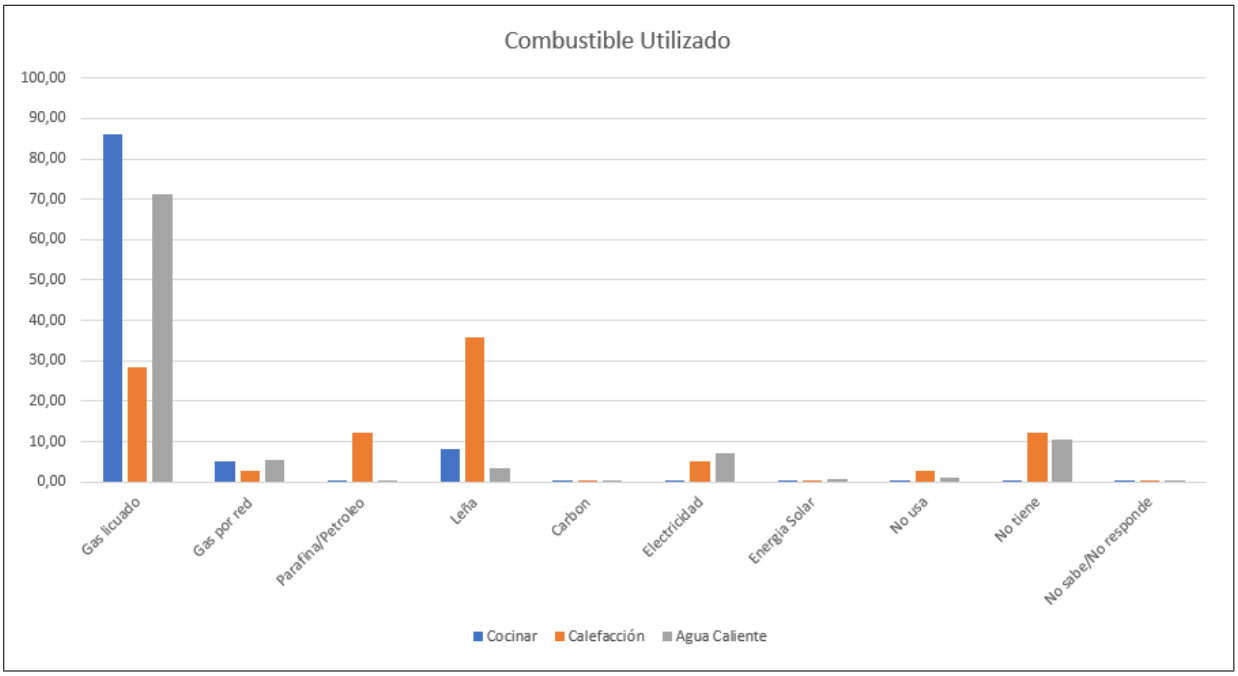


Figura 5.5: Combustible Utilizado.

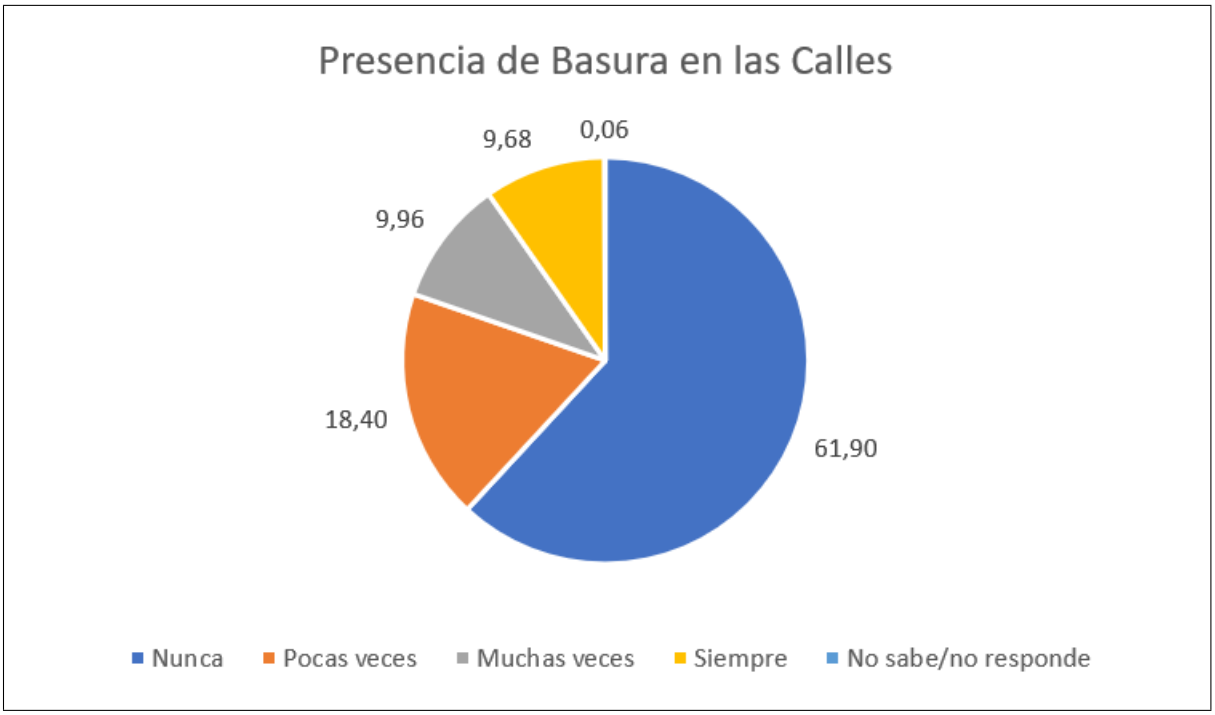


Figura 5.6: Percepción de Basura en las Calles.

5.2.2. Análisis Socioeconómico

El análisis socioeconómico contempla la desagregación según las comunas representativas seleccionadas por el estudio de caracterización de residuos sólidos domiciliarios en la región Metropolitana. La Tabla 5.12 muestra las comunas representativas seleccionadas por cada GSE.

Tabla 5.12: Comunas Representativas.

ABC1	Vitacura Providencia
C2	Santiago La Florida
C3	Quinta Normal Estación Central Puente Alto
D	La Pintana San Ramon Peñalolén
E	Alhué

El análisis general se acota a los resultados estadísticos útiles, dejando de lado la cantidad de hogares y viviendas, la cantidad de hogares por vivienda y la cantidad de viviendas por sitio. Es decir, para la desagregación por GSE, el análisis se realiza netamente por viviendas.

Análisis General

Dado que se deben eliminar datos para poder analizar por comuna, los resultados de la desagregación económica se muestran solo en porcentajes, dejando los resultados útiles.

La Tabla 5.13 muestra la cantidad de personas que viven por hogar, separado por GSE en porcentaje.

Análisis Específico

En la Tabla 5.14 se expresa el resultado del tipo de vivienda que habita cada GSE.

Una vez aislados los datos para las viviendas correspondientes a casas, la Tabla 5.15 muestra la cantidad de personas que habitan por casa.

Tabla 5.13: Personas por Hogar para cada GSE.

Personas por Hogar	**Porcentaje [%]**				
	ABC1	**C2**	**C3**	**D**	**E**
1	24,47	15,21	10,86	7,78	18,07
2	34,26	25,21	21,07	21,29	16,79
3	19,67	25,06	25,64	23,69	30,82
4	12,58	18,10	23,91	24,15	22,39
5	5,69	10,16	11,08	11,87	9,71
6	2,21	3,02	4,61	6,64	-
$\geq$7	1,12	3,24	2,83	4,58	2,22
Total	100	100	100	100	100

Tabla 5.14: Tipo de Vivienda por GSE.

Tipo de Vivienda	**Porcentaje [%]**				
	ABC1	**C2**	**C3**	**D**	**E**
Casa	26,35	63,11	81,78	87,85	100
Departamento	73,51	34,79	16,50	9,98	0
Otro	0,14	2,10	1,72	2,17	0
Total	100	100	100	100	100

Tabla 5.15: Personas por Casa.

Cantidad de Personas	**Porcentaje [%]**				
	ABC1	**C2**	**C3**	**D**	**E**
1	10,57	9,21	14,05	7,86	17,42
2	24,07	20,98	20,27	19,70	17,28
3	20,42	26,07	25,99	23,20	31,71
4	19,46	20,61	22,00	24,89	21,30
$\geq$5	25,48	23,13	17,69	24,35	12,29
Total	100	100	100	100	100

Análisis Variables de Interés

Nuevamente, las variables de interés estudiadas se encuentran acotadas al sector de la población de cada GSE que vive exclusivamente en casa.

La Tabla 5.16 y Tabla 5.17 presentan tanto la procedencia del agua como el sistema de distribución de ésta en las viviendas correspondientes a casas. La Tabla 5.18 muestra la disponibilidad de energía eléctrica.

Tabla 5.16: Procedencia del Agua.

Método	**Porcentaje [%]**				
	ABC1	**C2**	**C3**	**D**	**E**
Red Pública	100,00	100,00	100,00	100,00	92,3
Camion Aljibe	0	0	0	0	1,7
Otros	0	0	0	0	6,0
Total	100	100	100	100	100

Tabla 5.17: Distribución del Agua.

Método	**Porcentaje [%]**				
	ABC1	**C2**	**C3**	**D**	**E**
Con Llave	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0
Acarreo	0	0,1	0	0	0
Otro	0	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100

Tabla 5.18: Disponibilidad de Energía Eléctrica.

Método	**Porcentaje [%]**				
	ABC1	**C2**	**C3**	**D**	**E**
Red Pública	100,0	99,5	99,5	99,3	98,3
Generador	0	0	0	0	0
Mixto	0	0,2	0,2	0,4	1,7
Sin Enegría Eléctrica	0	0,3	0,3	0,3	0
NS/NR	0	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100

Las Tablas 5.19, 5.20 y 5.21 muestran una comparación de los combustibles usados tanto para cocinar, calefaccionar y los sistemas de agua caliente de las viviendas.

Finalmente, se presenta en la Tabla 5.22 la percepción de las personas sobre la acumulación de basura en las calles.

Tabla 5.19: Combustibles Usados por GSE ABC1 y C2.

	Porcentaje [%]					
GSE	**ABC1**			**C2**		
Actividad	**Cocinar**	**Calefaccionar**	**Agua Cal.**	**Cocinar**	**Calefaccionar**	**Agua Cal.**
Gas Licuado	30,9	20,6	30,0	87,0	52,8	82,6
Gas por Red	66,3	24,8	65,6	12,2	4,9	12,3
Parafina/Petroleo	0,5	31,1	1,7	0	26,7	0
Leña	0	0,3	0,5	0	0,5	0,2
Carbón	0	0	0,4	0	0	0
Electricidad	2,0	20,9	1	0,6	6,4	0,4
Energía Solar	0	0	0,6	0	0,3	0,2
No usa	0,3	1,1	0	0,2	3,0	0,3
No tiene	0	1,1	0,3	0,1	5,2	4,2
NS/NR	0	0	0	0	0,2	0
Total	100	100	100	100	100	100

Tabla 5.20: Combustibles Usados por GSE C3 y D.

	Porcentaje [%]					
GSE	**C3**			**D**		
Actividad	**Cocinar**	**Calefaccionar**	**Agua Cal.**	**Cocinar**	**Calefaccionar**	**Agua Cal.**
Gas Licuado	99,4	52,9	94,0	93,1	43	83,4
Gas por Red	0,3	0	0,3	6,2	2,9	6,9
Parafina/Petroleo	0	28,0	0	0	34,1	0,1
Leña	0,3	0,3	0,6	0,1	1,2	0,7
Carbón	0	0	0	0	0,1	0
Electricidad	0	6,1	0,9	0,2	6,0	0,1
Energía Solar	0	0,7	0,2	0	0,1	0,1
No usa	0	0,8	0	0,1	4,3	0,8
No tiene	0	11,3	4,1	0,4	8,4	7,9
NS/NR	0	0	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100	100

Tabla 5.21: Combustibles Usados por GSE E.

	Porcentaje [%]		
GSE	**E**		
Actividad	**Cocinar**	**Calefaccionar**	**Agua Cal.**
Gas Licuado	96,8	22,1	83,8
Gas por Red	0	0	0
Parafina/Petroleo	0	3,9	1,1
Leña	3,2	66,4	1,7
Carbón	0	1,7	0
Electricidad	0	2,1	3,2
Energía Solar	0	0	2,9
No usa	0	3,8	7,3
No tiene	0	0	0
NS/NR	0	0	0
Total	100	100	100

Tabla 5.22: Percepción de Basura en las Calles para Todos los GSE.

Percepción	**Porcentaje [%]**				
	ABC1	**C2**	**C3**	**D**	**E**
Nunca	84,3	59,8	32,7	33,9	72,3
Pocas Veces	10,6	16,7	20,0	13,6	10,1
Muchas Veces	3,9	11,4	15,9	17,0	5,5
Siempre	1,3	12,1	31,4	35,4	12,1
NS/NR	0	0	0	0,1	0
Total	100	100	100	100	100

5.3. Definición de Proceso

A partir de la información recopilada, se propone un proceso de biodigestión basado en el sistema BTA de dos etapas. Las decisiones expuestas se toman bajo el criterio de aumentar al máximo la producción de biogás, resguardando el costo de construcción y operación del equipo.

Se considera un proceso adaptado a una vivienda con 5 habitantes, abarcando al 92,42 % de las personas que viven en casa, según la Tabla 5.11. Además, de la Tabla 5.5 se obtiene el valor promedio de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, $\dot{m}_{BPP} = 0,59[kg/\text{dia}]$. Con estos valores es posible estimar ordenes de magnitud de alimentación del proceso.

A continuación, se enlistan los lineamientos a seguir por el proceso diseñado.

i. **Proceso de Dos Etapas:**

   Se plantea un proceso de dos etapas, donde en el primer reactor se producen los procesos de hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis, y en el segundo reactor se produce el proceso de metanogénesis. Como se ha planteado anteriormente, separar los procesos genera un aumento en la producción de biogás al mantener cada grupo de microorganismos al pH óptimo [105, 106].

ii. **Alimentación Semi Continua:**

   Debido a la naturaleza de la producción de la materia prima, se propone un sistema de alimentación semi continuo, bajo el supuesto de que la generación de basura ocurre con cada comida. Suponiendo dos comidas importantes a lo largo del día en una familia, se puede asumir que el ingreso de biomasa al reactor es de 1 vez al día.

iii. **Vía Húmeda:**

   Dada la poca cantidad de biomasa ingresada al sistema, se selecciona un funcionamiento mediante vía húmeda, facilitando la mezcla de la materia prima con los microorganismos correspondientes, acelerando el proceso de generación de gas [107]. Para esto, se plantea un sistema de trituración en la entrada, el cual se complementa con agua para alcanzar el nivel de solidos totales de 12 %, coherente con un sistema de vía húmeda.

iv. **Proceso Mesofílico:**

   Se selecciona un proceso mesofílico con el objetivo de reducir el gasto energético del digestor [108], ya que se debe alimentar energéticamente el sistema de mezclado del reactor, el sistema de regulación de temperatura y las bombas necesarias para trasladar el efluente.

A continuación, en la Figura 5.7 se muestra un diagrama de flujos del diseño tentativo del biodigestor.

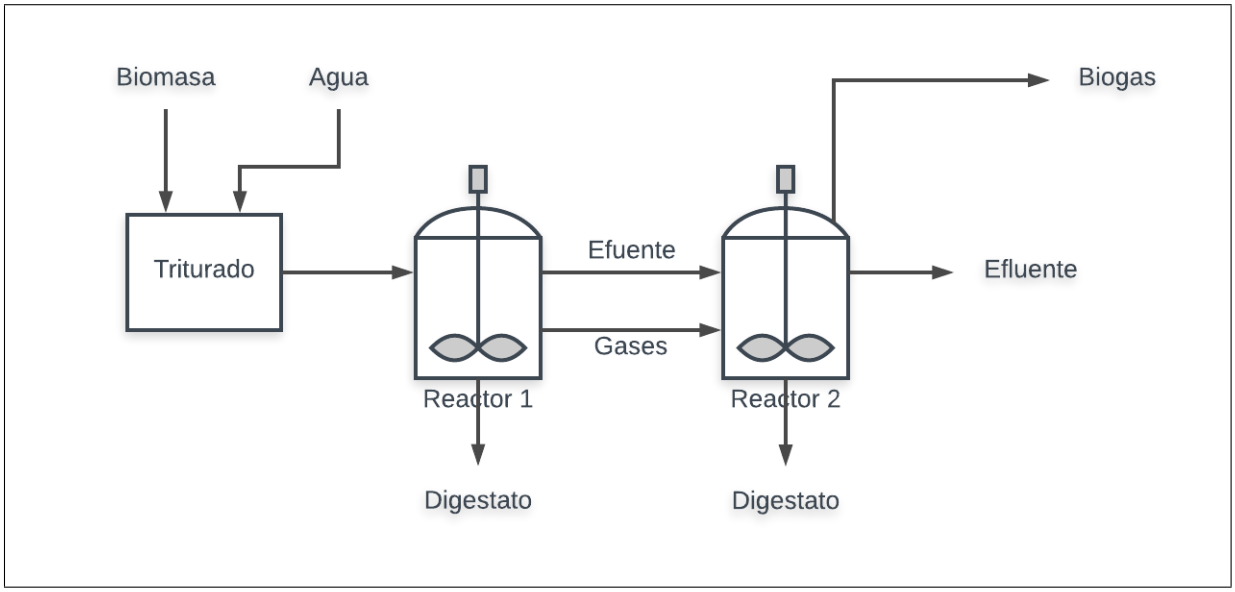


Figura 5.7: Diagrama de Flujo del Diseño (Elaboración Propia).

5.4. Selección de Tecnología

La selección del tipo de reactor utilizado en el diseño del biodigestor se realiza mediante el método utilizado por Njuguna en el documento titulado *Waste to Energy Bio-Digester Selection and Design Model for the Organic Fraction of Municipal Solid Waste*[109], donde se selecciona un reactor para la biodigestión de la fracción orgánica de los desechos sólidos domiciliarios.

Este método consiste en un análisis de decisión multi criterio basado en el costo del biodigestor, la disponibilidad local, la habilidad de regular la temperatura, escalabilidad, idoneidad para el tipo de sustrato, facilidad de construcción y presencia de agitador.

La ponderación que se le da a cada criterio, y el valor que se le asigna a cada uno de los reactores en cada criterio, se obtiene de una recopilación de información obtenida de distintos stakeholders asociados a la bioenergía y la industria de la economía sustentable.

En los tipos de reactor investigados se incluye el reactor anaerobio de flujo ascendente (USAB), reactor de tanque de mezcla continua (CSTR), reactor tubular continuo (plug flow), laguna cubierta y filme fijo.

Se utiliza un método de suma ponderada para obtener los resultados, tomando el valor de cada criterio y multiplicándolo por la importancia del criterio. El resultado está dado por la suma de cada criterio general para cada alternativa en particular.

El método es modificado eliminando aquellos criterios que no tienen relevancia en el desarrollo del presente trabajo, dejando solamente para la elección la escalabilidad, idoneidad para el sustrato, habilidad de regular temperatura y presencia de agitador.

En la Tabla 5.23 se presentan los parámetros restantes con los cuales se selecciona el

reactor. Dado que el reactor de tanque de mezcla completa es el que tiene el puntaje más alto, es el seleccionado para el diseño del biodigestor.

Tabla 5.23: Análisis de Decisión Multi Criterio para Selección de Reactor (Adaptado de [110]).

Criterio	**Escalabilidad**		**Idoneidad para el Sustrato**		**Regulación de Temperatura**		**Agitador**		
Ponderación	**0,2**		**0,2**		**0,1**		**0,005**		
Tipo de Digestor	Puntuación	Puntuación Ponderada	Puntuación	Puntuación Ponderada	Puntuación	Puntuación Ponderada	Puntuación	Puntuación Ponderada	Puntuación Total
CSTR	0,85	0,17	0,8	0,16	0,8	0,08	0,9	0,01	**0,41**
UASB	0,65	0,13	0,3	0,06	0,75	0,08	0,8	0	**0,27**
Plug Flow	1	0,2	0,4	0,08	0,6	0,06	0,6	0	**0,34**
Cvd. Lagoon	0,4	0,08	0,5	0,1	0,5	0,05	0,3	0	**0,23**
Fixed Film	0,4	0,08	0,6	0,12	0,7	0,07	0,75	0	**0,27**

5.5. Estimación de Biogás

La producción de biogás se estima en base al estudio publicado por Fongsatitkul [111], donde se realiza un método de aproximación de la producción de metano en un digestor anaeróbico mesofílico de dos etapas en base a la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales.

El objetivo del estudio es comprobar que la cantidad de biogás generada de manera experimental puede ser predicha mediante el modelo teórico de Chen-Hashimoto. Para esto se utilizan dos grupos de reactores, el primero para obtener las constantes cinéticas asociadas al modelo teórico, y el segundo para verificar que la producción empírica de biogás se condice con lo predicho por el modelo teórico si las constantes son conocidas.

La producción máxima de biogás en litros de CH_4 por litros de reactor por día se calcula como:

$$\delta_{max} = \frac{Y_o S_o}{(\theta_{meth})_{min}} \left[\frac{\sqrt{k}}{(1+\sqrt{k})(k+\sqrt{k})} \right]$$

Donde:

Y_0	=	Producción máxima de metano teórico a CNPT $[L_{CH_4}/gVS_{feed}]$.
S_0	=	Concentración de sustrato inicial $[mg/L]$.
$(\theta_{meth})_{min}$	=	Tiempo de retención hidráulica mínimo para evitar lavado del reactor metanogénico [dia].
k	=	Constante cinética adimensional.

El experimento se realiza en base a una digestión húmeda, con distintos niveles de sólidos totales, comparando, además, los resultados en función de distintos TRH. Los autores obtienen como resultado que el modelo basado en bioquímica fundamental subestima la producción de metano en un promedio de 16,5 %.

La Tabla 5.24 resume los principales resultados obtenidos en el estudio.

Tabla 5.24: Parámetros Cinéticos a Distintos Valores de ST.

Parámetros		**Concentración de Sólidos**		
		8 %	**12 %**	**15 %**
S_o	$[gVS_{feed}l^{-1}]$	68,63	102,50	127,3
Y_o	$[l_{CH_4}gVS_{feed}^{-1}]$	0,656	0,663	0,586
k	Adimensional	0,867	0,846	0,814
μ_{max}	$[\text{dia}^{-1}]$	0,095	0,084	0,0078
$(\theta_{meth})_{min}$	[dia]	10,58	11,93	12,77
δ_{max}	$[l_{CH_4}l_{RCTR}^{-1}\text{dia}^{-1}]$	1,14	1,50	1,62

Debido a las similitudes entre las condiciones de operación del trabajo realizado por Fongsatitkul con el diseño presentado en el presente documento, se utiliza este estudio para estimar la producción de metano máxima del equipo. Además, los resultados se corrigen con los valores teóricos levantados de la bibliografía utilizada, mostrados en la tabla 5.25

Tabla 5.25: Datos Usados Para Ajuste.

Fuente	**Valor** $[l/\text{dia}]$
España [112]	754
Díaz [113]	1235
Gómez [114]	240
Promedio	743

Finalmente, se usa un factor de corrección de 0,9 para la generación de biogás.

5.6. Criterio Económico

El método de análisis económico utilizado se basa en el criterio de inversión del *Valor Actual Neto*. El criterio del *Valor Actual Neto* es un procedimiento que permite saber cuanto se va a ganar o perder en una inversión al actualizar los cobros y pagos de un proyecto. El *VAN* expresa una medida de rentabilidad del proyecto en términos absolutos [115].

El *VAN* se define según:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{F_t}{(1+k)^t}$$

Donde:

t = Periodo.
I_0 = Inversión realizada en el momento inicial (t=0).
F_t = Flujos de dinero en periodo t.
k = Tipo de descuento o interés exigido a la inversión.

Para este trabajo, los flujos de dinero se representan como la diferencia entre los costos de operación y el ahorro generado por el equipo. Este ahorro se obtiene en base al valor monetario del gas de cañería.

El valor del gas de cañería se estima en $793 en base a los valores entregados por la *CNE* [116] como un promedio de la información entregada. El costo de operación corresponde netamente a energía eléctrica, por lo que se estima su valor en 110 [$/kWh] [117]. La cantidad promedio de gas utilizado se extrapola de los datos entregados por *EyN*[118], siendo de 72,5 $[m^3]$ para una familia de 6 personas. La producción de gas se obtiene de la Tabla 5.24 y el factor de corrección es de 0,9; quedando una producción de 1,35 $[l_{CH_4}/l_{RCTR}/\text{dia}]$

En la Tabla 5.26 se presentan las principales componentes del flujo de dinero:

Tabla 5.26: Componentes Flujo de Dinero.

Componente	**Valor**	
Precio gas	793	[$]
Gas utilizado	72,5	$[m^3]$
Precio energía	110	[$/kWh]

La inversión inicial se toma como el costo del prototipo mas el costo de la mano de obra. La tasa de descuento utilizada es de 10 % para proyectos eléctricos y la cantidad de periodos se considera de 20 años.

Capítulo 6

Diseño General

6.1. Identificación de Subsistemas

En esta sección se especifican los subsistemas existentes en cada reactor, con sus principales componentes.

6.1.1. Subsistema de Alimentación

Corresponde al ingreso de la materia orgánica. Es el encargado de triturar, transportar, retirar el aire y mezclar con agua la basura que ingresa al reactor.

6.1.2. Subsistema del Reactor

Corresponde al reactor en sí mismo, donde se realiza el procesamiento de materia orgánica. Es el lugar donde se alberga la basura en descomposición, el efluente y el gas generado. Esto abarca tanto la geometría como la configuración de los reactores utilizados.

6.1.3. Subsistema de Agitación

Corresponde al equipo utilizado para realizar el mezclado del agua, los productos, la materia prima y los microorganismos, mejorando la superficie de contacto y acelerando el proceso. Es, además, el encargado de evitar que el material particulado decante perdiendo contacto con los microorganismos.

6.1.4. Subsistema de Calefacción

Corresponde al equipo utilizado para mantener la mezcla a una temperatura mesofílica. Se seleccionan 35°C para el proceso para no generar grandes consumos de energía, y por ende, un consumo energético de operación reducido.

6.1.5. Subsistema de Soporte

Contempla toda la estructura de perfiles sobre la cual se encuentran soportados los otros subsistemas. Además, considera el sistema de fijación al piso para evitar volcamiento o caídas.

6.2. Definición de Subsistemas

6.2.1. Subsistema de Alimentación

El subsistema de alimentación se inspira en sistemas de molienda de productos orgánicos manuales, como podría ser un moledor de carne. Consta de un tornillo sinfín que recibe la materia orgánica a través de una tobera, para ser empujada de manera mecánica por el usuario a una sección de trituración, donde el material se reduce de tamaño y elimina el oxígeno que pueda contener. En el proceso además es mezclado con el agua presente en el sistema alcanzando la concentración de sólidos totales necesaria para el funcionamiento de equipo especificada en la sección 5.3. Una representación esquemática del subsistema se muestra en la Figura 6.1.

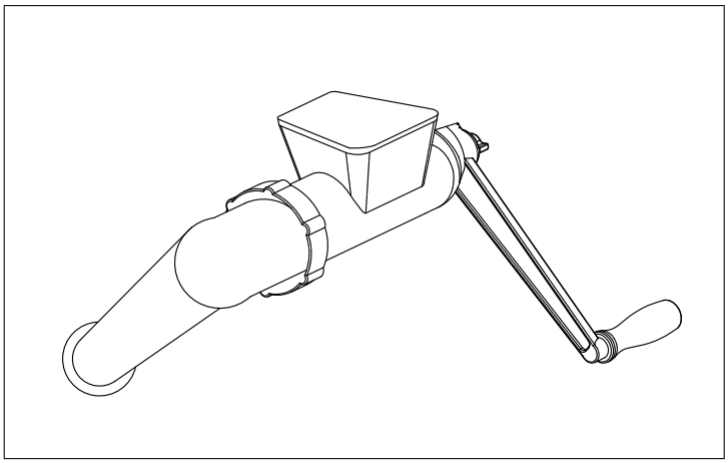


Figura 6.1: Subsistema de Alimentación (Elaboración Propia).

El subsistema de alimentación también contempla el ingreso del agua necesaria para mantener la cantidad de sólidos totales estable. Para esto, se considera una válvula de accionamiento eléctrico conectada a la fuente de agua con capacidad de alimentación de $5[l/\mathrm{di}a]$. El Anexo B presenta la memoria de cálculo que describe la cantidad de agua necesaria para que

la concentración de sólidos totales se mantenga constante, además, para cálculos futuros, se define la densidad de la mezcla. Se utilizan los valores de sólidos totales [$\%ST_B$], retención de agua [C_R] y densidad de basura definidos de la literatura [119].

$$\begin{aligned} \%ST_B &= 32{,}3\,\%. \\ C_R &= 0{,}695\,\%. \\ \rho_{basura} &= 470\ [kg/m^3]. \end{aligned}$$

6.2.2. Subsistema del Reactor

El subsistema correspondiente al reactor se define en base a un volumen útil unitario de aproximadamente 0,5 m^3. Para fijar este valor se toma la geometría señalada por el estándar API 650 para diseños de estanques a presión atmosférica [120]. Este estándar da lineamientos sobre las proporciones de las dimensiones principales de un estanque.

Este código se utiliza solo como referencia, ya que originalmente está pensada para tanques de almacenamiento de fluidos líquidos, trabajando a presión atmosférica y construidos de acero con el fondo uniformemente soportado por una cama de arena, grava, cemento, asfalto, etc. Además se acota a una temperatura de operación no mayor a 93°C. Este estandar estipula también que los estanques no deben llenarse mas allá del 80 % de su volumen total [121].

Basándose entonces en el estándar API 650, se selecciona una geometría estipulada inicialmente para recipientes de sólidos; compuesta de una cabeza elipsoidal, una carcasa cilíndrica y un fondo cónico, debido a la posible acumulación de material particulado en el fondo. La relación de dimensiones entre las distintas partes se mantiene para estanques líquidos, teniendo tanto la cabeza como el fondo una altura igual a un cuarto del diámetro del cilindro, como se puede apreciar en la Figura 6.2.

Para la forma de la cabeza elipsoidal se considera la geometría regida por la norma ASME Section VIII [123], mostrada en la Figura 6.3.

En la Tabla 6.1 se presentan las dimensiones principales del recipiente según la Figura 6.2. Estas dimensiones dan valores de $V_{total} = 0,711[m^3]$ y $V_{util} = 0,56[m^3]$. La memoria de cálculo correspondiente se encuentra en el Anexo C.1.

Tabla 6.1: Dimensiones del Reactor.

Parámetro	**Dimensión [m]**
H	1,2
h	0,2
D	0,8
d	0,4

La selección del material se realiza en función de las condiciones de operación. Dado que

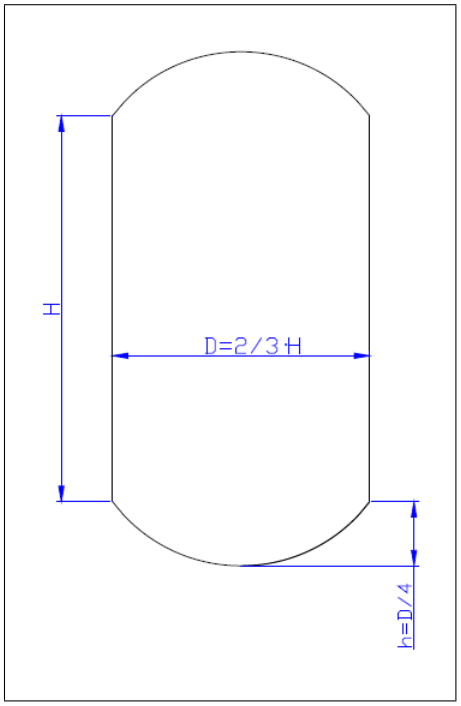


Figura 6.2: Geometría Reactor [122].

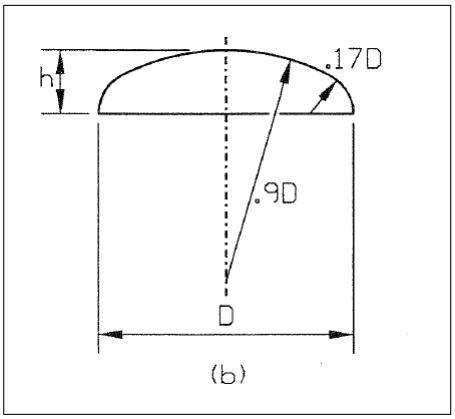


Figura 6.3: Geometría Cabeza Elipsoidal [124].

éstas no presentan condiciones particularmente agresivas, teniéndose un pH que ronda entre 6,5 y 7,5, y una temperatura de trabajo de aproximadamente 35°C. Se selecciona un acero AISI 304L, ya que posee una gran resistencia a la corrosión [125], permite una fabricación sencilla y es comercialmente accesible.

El cálculo del espesor mínimo que debe tener el tanque se calcula en función de la presión de trabajo que debe resistir, mostrado en el Anexo C.2, tomando como límite de fluencia del material de 170 $[MPa]$ [126]. El valor obtenido se encuentra por debajo de lo que recomienda la norma ASME BPVC [127], que dicta que cualquier recipiente debe ser de a lo menos 1,5 [mm] de espesor, siendo posible utilizar cualquier material que resista las condiciones de operación. Por practicidad en términos constructivos, se selecciona un espesor de 3 [mm] al encontrarse disponible en el mercado.

Además, se considera dentro de este subsistema el aislamiento de lana mineral que recubre y aísla el sistema, las válvulas de retención de gas que regulan el flujo de biogás generado, y las válvulas de pie que regulan el flujo de efluente líquido, las cuales deben regularse para trabajar a la presión de operación deseada. El subsistema del reactor también contempla las respectivas mangueras.

6.2.3. Subsistema de Agitación

Para el subsistema de agitación se selecciona un agitador tipo paleta, ya que es el más usado en la industria química, dada la simplicidad en el diseño, construcción, y los bajos costos en comparación con geometrías más complejas y procesos de manufactura mas delicados [128].

La geometría y las dimensiones se basan en una turbina estándar tipo Rushton, sin embargo, se toman las consideraciones de Castillo para la suspensión de sólidos en líquidos (ver Figura 6.4) [129].

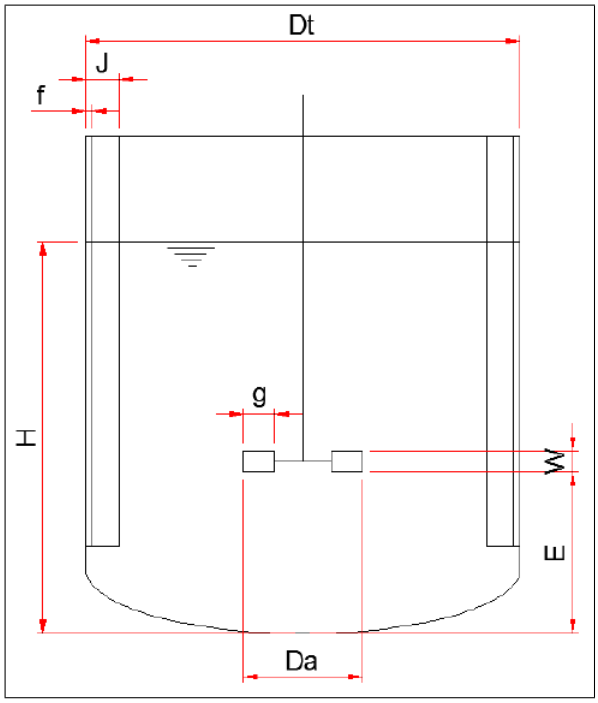


Figura 6.4: Esquema Dimensiones Turbina.

Del mismo documento se proponen las siguientes proporciones:

- $\frac{H}{D_t} = 1$
- $\frac{D_a}{D_t} = 0,33$
- $\frac{E}{D_t} = 0,33$
- $\frac{W}{D_a} = 0,2$
- $\frac{g}{D_a} = 0,25$
- $\frac{J}{D_t} = 0,1$
- $\frac{f}{D_t} = 0,02$

A partir de las dimensiones propuestas por Castillo, y acotando los valores a unos de fácil construcción, se obtienen las dimensiones especificadas en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Dimensiones de la Turbina.

Parámetro	**Dimensión [m]**
D_a	0,25
E	0,25
W	0,06
g	0,70

El agitador y sus componentes se fabrican de acero inoxidable AISI 316L debido a la resistencia a la corrosión, buena respuesta a trabajos en ambientes húmedos y la resistencia tanto a altas como a bajas temperaturas [130].

La velocidad de giro para asegurar una suspensión completa de las partículas se calcula según la ecuación propuesta por Nagata [131], cuyo cálculo, con sus debidas consideraciones, se encuentra en el Anexo D.1 en base a los valores especificados en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Valores Utilizados Potencia Agitador (Adaptado [132]).

Parámetro	**Valor**	**Unidades**
r	1,87	-
K	207	-
d_p	1,6	[mm]
μ	1	[cP]
ρ_s	0,47	$[g/cm^3]$
ρ_l	1	$[g/cm^3]$

La potencia requerida para alcanzar la velocidad de giro necesaria para asegurar una suspensión completa se calcula según el método expuesto en el Anexo D.2.

Para el cálculo del diámetro necesario para que el eje no entre en colapso al alcanzar la velocidad crítica realiza el procedimiento explicado en el Anexo D.3. Para estos cálculos, se asume que la potencia usada es de 1 [HP] y que las RPM ascienden a 360.

Como forma de síntesis, se presenta la Tabla 6.4 con los valores obtenidos.

En función de los valores obtenidos, se selecciona un motoreductor de la compañía *Brother International Corporation*, el cual debe ser acoplado al reactor. La Tabla 6.5 presenta los principales parámetros del equipo.

Tabla 6.4: Resumen de Parámetros del Agitador.

Parametro	**Valor**	
N_f	287,29	$[rps]$
P	426,62	$[W]$
d	0,74	$[cm]$

Tabla 6.5: Datos Técnicos Motoreductor (Cortesía Brother USA).

Parámetro	**Valor**	
Velocidad Angular	360	$[RPM]$
Relación de Transmisión	5	
Potencia	0,75	$[kW]$

6.2.4. Subsistema de Calefacción

El subsistema de calefacción se modela en función del promedio de las temperaturas mínimas de Santiago, de 3°C. Se considera que el reactor tiene que estar en todo momento a 35°C, ya que variaciones en este parámetro pueden significar una falla total en el sistema.

Pese a que los microorganismos generan calor en su actividad y que se considera aislamiento de lana mineral de 1 [cm] para los reactores, se adicionan calefactores eléctricos de inmersión en ambos estanques para asegurar una temperatura óptima de operación. El Anexo E cuenta con la memoria de cálculo asociada al subsistema de calefacción, considerando los siguientes valores de coeficientes conductivos [133]:

$$\begin{aligned} k_{lana} &= 0{,}042 \quad [W/m°C] \\ k_{acero} &= 41 \quad [W/m°C] \end{aligned}$$

Los coeficientes convectivos para el agua en convección forzada y para el aire en la convección natural externa son [134, 135]:

$$\begin{aligned} h_{agua} &= 44{,}5 \quad [W/m^2°C] \\ h_{aire} &= 2 \quad [W/m^2°C] \end{aligned}$$

Finalmente, se obtiene que la potencia necesaria que debe ser entregada al equipo para mantener la temperatura deseada, en el caso más conservador, es de 173,07 [W].

Los requerimientos energéticos del sistema se pueden suplir entonces con un calefactor de inmersión en cada reactor. Estos calefactores alcanzan una potencia máxima de 1200 [W] y son suministrados por la empresa *Fabrestel*, mostrados en la Figura 6.5.

Además, se debe contar con un sistema de control que mantenga la temperatura estable a lo largo del tiempo. Para esto se consideran dos termocuplas, una en cada reactor, para medir

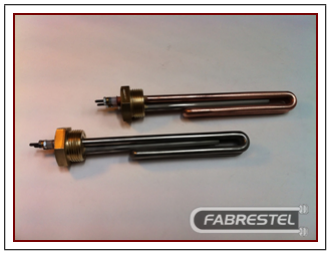


Figura 6.5: Calefactor Seleccionado (Cortesía Fabrestel).

la temperatura y un sistema de PID que controle el encendido y apagado de los calefactores.

6.2.5. Subsistema de Soporte

El subsistema de soporte se define como una estructura de perfiles con la finalidad de soportar el equipo completo. Para esto, se calcula el pandeo en los elementos críticos de la estructura, que es donde se concentra la mayor parte del peso.

El peso de la mezcla se calcula considerando un llenado total de los reactores, mientras que el de los reactores se calcula considerando que las dimensiones presentadas en la Tabla 6.1 son las dimensiones interiores y el espesor de 3 [mm] es desde esta cota hacia adentro. Además, se estima que la masa de los componentes extra es de 100 [kg]. La densidad del acero AISI 304L usado en el reactor es $\rho_{304L} = 7930[kg/m^3]$ [136] y la del acero estructural ASTM A36 usado para el sistema de soporte es de $\rho_{A36} = 7860[kg/m^3]$ [137].

El cálculo del peso se realiza en el Anexo F.1 mediante la adición del peso de la mezcla, el peso de los reactores y el peso de componentes varios. Además, se calcula el peso de la estructura para análisis posteriores.

La memoria de cálculo relacionada al pandeo de los perfiles que concentran el peso del sistema se encuentra en el Anexo F.2.

Tomando un módulo de Young del acero utilizado de 200 [GPa] [138], y una longitud de las dos principales barras de 1,05 [m], se obtiene un valor crítico para el segundo momento de área de 2542,82 $[mm^4]$. Si se considera un factor de sobrecarga de 1,5 en el marco sometido a la mayor solicitud de 2F. Tomando perfiles de acero de 50x50x3 [mm] en forma de ángulo, y calculando, su segundo momento de área, se obtiene que éste es de 10195 $[mm^4]$, superando el valor crítico, y por ende, resistiendo el pandeo.

Dentro del subsistema de soporte, se encuentra considerado el anclaje del equipo. La norma técnica del Minvu NTM001 [139] especifica que no es necesario que el sistema cumpla con los requisitos de fuerza y desplazamiento de ASME BPVC, mas si con las secciones 6.1 y 6.2 de la misma norma técnica. El cálculo de las cargas que debe resistir el sistema de anclaje se encuentra en el Anexo F.3.

Se utiliza un factor de importancia $I_p = 1,5$ ya que corresponde a un equipo inflamable [140]. El parámetro de espectro de pseudoaceleración se toma como $\alpha_A A = 977z[cm/s^2]$ para

un tipo de suelo tipo A [141, 142]. El parámetro z asociado a la zona sísmica 2 corresponde a 0,75 [143].

Una vez obtenida la fuerza F_p de $28373,9[N]$ se calcula el diámetro de los pernos y el espesor de las placas de anclaje modelando el sistema de tal manera que F_p sea perpendicular al plano del piso y aplicado de tal manera que exija al máximo al sistema. Una vez obtenida la fuerza se compara con las tablas respectivas de los pernos.

En base a los resultados obtenidos, se selecciona una placa de acero ASTM A36 de 5 [mm] y cuatro pernos de anclaje de 1/2" posicionados en la esquina del subsistema de soporte.

Capítulo 7

Resultados

7.1. Planos

A partir de las decisiones tomadas en la sección 6.2, es posible la generación de planos generales del equipo y sus principales subsistemas.

El Anexo G presenta el plano del conjunto completo, mientras que el Anexo H se presentan planos de detalles de la secciones más importantes.

7.2. Cubicación

La cubicación se realiza con el objetivo de estimar el costo de mano de obra del equipo. Para la realización de esta estimación, se hace un análisis por subsistema. A continuación, en las siguientes tablas, se muestra la cubicación correspondiente a cada subsistema.

La Tabla 7.1 muestra la cubicación correspondiente al subsistema de alimentación.

Tabla 7.1: Cubicación Subsistema Alimentación.

Descripción	**Cantidad**	**Material**	**Alto** [mm]	**Ancho** [mm]	**Espesor/Diámetro** [mm]	**Largo** [mm]	**Largo Total** [m]	**Valor Unitario** [$/unidad]	**Valor Total** [$]
Trituradora	1	Comercial	-	-	-	-	-	52927	52927
Electroválvula	1	Comercial	-	-	-	-	-	24090	24090
Manguera Agua	1	Polietileno	-	-	12,7	2000	2	687,6	1375,2
								Total Subsistema	78392,2

La Tabla 7.2 muestra la cubicación correspondiente al subsistema del reactor.

Tabla 7.2: Cubicación Subsistema Reactor.

Descripción	**Cantidad**	**Material** (-)	**Alto** [mm]	**Ancho** [mm]	**Espesor/Diámetro** [mm]	**Largo** [mm]	**Largo Total** [m]	**Valor Unitario** [$/unidad]	**Valor Total** [$]
Cuerpo	1	AISI 304L	1200	2600	3	-	-	6200	19344
Cabeza	1	AISI 304L	1000	1000	3	-	-	6200	6200
Base	1	AISI 304L	200	2600	3	-	-	6200	19344
Aislación	1	Lana Mineral	1600	2600	10	-	-	3333	13865,3
Válvula de Pie	2	Comercial	-	-	-	-	-	5190	10380
Válvula Antirretorno	2	Comercial	-	-	-	-	-	5390	10780
Manguera Agua	2	Polietileno	-	-	-	1000	2	687,6	1375,2
Manguera Gas	2	Polietileno	-	-	-	1000	2	687,6	1375,2
Placa Sup. Cilindro	8	ASTM A36	200	300	3	-	-	30416,7	14600,1
Placa Superior	12	ASTM A36	100	53	6	-	-	30416,7	1934,5
Placa Intermedia	2	ASTM A36	50	50	6	-	-	30416,7	152,1
Placa Bastidor	6	ASTM A36	200	300	5	-	-	30416,7	10950,1
Placa Tambor	12	ASTM A36	100	150	3	-	-	30416,7	5475,1
								Total	115775,6

La Tabla 7.3 muestra la cubicación correspondiente al subsistema de agitación.

Tabla 7.3: Cubicación Subsistema Agitación.

Descripción	**Cantidad**	**Material** (-)	**Alto** [mm]	**Ancho** [mm]	**Espesor/Diámetro** [mm]	**Largo** [mm]	**Largo Total** [m]	**Valor Unitario** [$/unidad]	**Valor Total** [$]
Motoreductor	2	Comercial	-	-	-	-	-	272000	544000
Flange	1	Comercial	-	-	450	-	-	60000	60000
Chaveta	2	Comercial	-	-	-	-	-	1200	2400
Pernos	11	Comercial	-	-	-	-	-	120	1320
Eje	1	AISI 316L	-	-	35	270	0,27	4440	1198,8
Masa	1	AISI 316L	-	-	35	50	0,05	18330	916,5
Paleta	6	AISI 316L	65	70	3	-	-	18330	500,409
Sello	1	Comercial	-	-	-	-	-	990	990
								Total	611325,709

La Tabla 7.4 muestra la cubicación correspondiente al subsistema de calefacción.

Tabla 7.4: Cubicación Subsistema Calefacción.

Descripción	**Cantidad**	**Material** (-)	**Alto** [mm]	**Ancho** [mm]	**Espesor/Diámetro** [mm]	**Largo** [mm]	**Largo Total** [m]	**Valor Unitario** [$/unidad]	**Valor Total** [$]
Calefactor	2	Comercial	-	-	-	-	-	26990	53980
Termocupla	2	Comercial	-	-	-	-	-	20090	40180
Controlador PID	1	Comercial	-	-	-	-	-	150000	150000
								Total	244160

La Tabla 7.5 muestra la cubicación correspondiente al subsistema de soporte.

Tabla 7.5: Cubicación Subsistema Soporte.

Descripción	**Cantidad**	**Material** (-)	**Alto** [mm]	**Ancho** [mm]	**Espesor/Diámetro** [mm]	**Largo** [mm]	**Largo Total** [m]	**Valor Unitario** [$/unidad]	**Valor Total** [$]
Perfil	19	ASTM A36	50	50	3	-	42	1798	75516
Placa Anclaje	4	ASTM A36	150	150	5	-	-	30416,7	2737,503
Placa Gusset Perfil	12	ASTM A36	150	150	3	-	-	30416,7	8212,509
Placa Central Perfil	8	ASTM A36	200	150	3	-	-	30416,7	7300,008
Pernos Anclaje	4	Comercial	-	-	12,7	125	-	2990	11960
								Total	105726,02

A modo de resumen, la Tabla 7.6 hace una síntesis de los valores obtenidos en la sección 7.2

Tabla 7.6: Resumen Cubicación.

Subsistema		**Precio**
Alimentación	$	$78392,2$
Reactor	$	$115775,6$
Agitación	$	$611325,7$
Calefacción	$	$244160,0$
Total	$	$1049653,5$

Finalmente, se estima un tiempo de producción de 100 horas, y se considera un costo de mano de obra de 10 [$/hora]. Esto da un costo de producción aproximado de $2.050.000 por unidad.

7.3. Análisis Económico

El análisis económico se realiza en función del *VAN* con los valores mostrados en la Tabla 5.26.

Se considera un periodo de 20 años, es decir 240 meses y una inversión inicial equivalente al costo de producción unitario, $2.050.000. Los flujos de dinero son la diferencia entre los costos de operación y el ahorro generado, éstos se muestran en la Tabla 7.7. La energía necesaria para mantener funcionando el sistema es de 1200 [W], es decir, 864 [kWh] funcionando durante todo el mes. La producción de gas es de 1,35 [$l_{CH_4}/l_{RCTR}/\mathrm{dia}$] en 0,56 [$l_{RCTR}$]

Finalmente, el *VAN* es de -$2.820.550, haciendo el proyecto no viable económicamente.

Tabla 7.7: Flujos de Dinero.

Flujo	**Variable**	**Valor**	**Total**
Ahorro Generado	22 $[m^3/mes]$	793 $[\$/m^3]$	\$17.985
Costo de Operación	864 $[kWh/mes]$	110 [\$/kWh]	\$95.040

Capítulo 8

Conclusiones

En conclusión, se ha generado un diseño a nivel de perfil de un equipo de producción de biogás, con factibilidad técnica capaz de operar en una residencia y ser operado de manera estable por un usuario no especializado. El equipo consta de 2 reactores unidos por mangueras para el transporte de gas y líquido, con una trituradora de comida incorporada para la entrada. Se considera también 1 calefactor de inmersión por cada reactor, y un sistema de agitación impulsado por un motoreductor.

Dado que las configuraciones de los biodigestores son variadas, dependiendo finalmente de cada caso particular, no es posible realizar una recopilación bibliográfica de todas las tecnologías utilizadas para la producción de biogás. Sin embargo, sí se realiza un levantamiento de experiencias industriales que han sido exitosas.

La *Encuesta de Caracterización Socioeconómica* da buenos lineamientos para identificar el contexto social en el cual se implementaría el equipo, ya que es posible obtener resultados a nivel de detalle. Por otro lado, la materia prima es caracterizada según un estudio empírico realizado en las comunas representativas, por lo que es posible extrapolarlo al contexto actual. Pese a que ambos análisis pudieron realizarse con éxito, es necesario profundizar en ellos. En particular se recomienda realizar un estudio a cabalidad de los componentes de la materia orgánica, ya que es la variable más importante en términos de estimación de producción de biogás.

El diseño del biodigestor se acotó a la generación de planos de disposición general y planos de detalles de los principales componentes. Además, se realizó una estimación del costo del prototipo, aproximandose éste en 2.050.000 [CLP], y una evaluación económica mediante el cálculo del *VAN*, obteniendose uno de -2.820.550 [CLP] a 20 años. Los mayores costos se asocian a la energía.

Es necesario, en caso de generar un prototipo viable tanto técnica como económicamente, hacer una revisión de la normativa y legislación chilena en el tema del biogás. El diseño aquí planteado contempla una mezcla con el gas de cañería, sin embargo, tanto en términos técnicos como legales se pueden presentar problemas al implementar la máquina.

Cabe destacar que el diseño aquí presentado corresponde a un nivel conceptual, con detalles en los elementos críticos del equipo. Pese a realizarse una estimación de biogás, no existen métodos teóricos para saber cuanto biogás se puede producir, por lo que es necesario realizar un test de digestión para asegurar un correcto análisis.

Bibliografía

[1] Camilo Villa. Evoluciona conciencia ambiental en chilenos. [en línea] <https://radio.uchile.cl/2018/02/20/estudio-revela-que-chilenos-son-cada-vez-mas-conscientes-del-cambio-climatico/>, Febrero 2018. [consulta: 29 diciembre 2018].

[2] Claudio Cerda. El problema de los residuos. [en línea] <http://uchile.cl/s135687>, Agosto 2017. [consulta: 2 noviembre 2018].

[3] VCM. En Chile solo un 10 % de los residuos que se generan al año se reciclan. [en línea] <https://vcm.emol.com/303/inspiracion/chile-solo-10-los-residuos-se-generan-al-ano-se-reciclan/>, Julio 2017. [consulta: 2 noviembre 2018].

[4] EcoInventos. Suecia recicla un asombroso 99 % de su basura. [en línea] <https://ecoinventos.com/suecia-recicla-un-asombroso-99-de-su-basura/>, Enero 2017. [consulta: 2 noviembre 2018].

[5] G. Kiss and G. Encarnación. Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, 1(79):39–51, 2016.

[6] Carlos Sánchez, Adolfo Narros, María del Peso, María de la Fuente, and María Rodríguez. Emisiones superficiales de metano en vertederos. ¿por qué y cómo cuantificarlas? In *13º Congreso Nacional de Medio Ambiente - CONAMA 2016*, pages 1–9, Madrid, 20 noviembre - 1 diciembre 2016.

[7] José Álvarez. Investigación y desarrollo tecnológico de procesos de compostaje y aplicación del compost en los sectores agrícola y forestal. Technical report, EGMASA, 2010.

[8] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 602.

[9] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 585.

[10] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide to biogas, from production to use.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Alemania, 2012. p. 31.

[11] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 153.

[12] María Lienqueo. Caracterización de la biomasa. BT4551 Energía Renovable a Partir de Biomasa [Material de cátedra], Agosto 2016. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

[13] Área Medio Ambiente y Energías Renovables. *Guía para evaluación ambiental, energías renovables no convencionales, proyectos de biomasa.* Comisión Nacional de Energía, Santiago, Chile, Mayo 2007. p. 17.

[14] Gustavo Rondanelli, Diego Ruiz, and Gustavo Pasquale. *Química de la biomasa y los biocombustibles.* Editorial de la Universidad de La Plata, La Plata, 1st edition, 2016. p. 41.

[15] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 2-3.

[16] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 152.

[17] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 585.

[18] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide to biogas, from production to use.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Alemania, 2012. p. 31.

[19] Área Medio Ambiente y Energías Renovables. *Guía para evaluación ambiental, energías renovables no convencionales, proyectos de biomasa.* Comisión Nacional de Energía, Santiago, Chile, Mayo 2007. p. 23.

[20] María Varnero. *Manual de biogás.* Ministerio de Energía, Santiago, Chile, 2011. p. 16.

[21] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 153.

[22] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 585.

[23] María Lienqueo. Biogás. BT4551 Energía Renovable a Partir de Biomasa [Material de cátedra], Septiembre 2016. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

[24] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 152.

[25] María Varnero. *Manual de biogás.* Ministerio de Energía, Santiago, Chile, 2011. p. 56.

[26] Susana Gómez. Diseño, construcción y puesta a punto de un biodigestor tubular. Carazo - Nicaragua. Tesis de maestría, Universidad Carlos III de Madrid, Octubre 2012. p. 23.

[27] María Varnero. *Manual de biogás.* Ministerio de Energía, Santiago, Chile, 2011. p. 71.

[28] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 586.

[29] Abu Talib, Kathryn Ford, and Jean-Francois Henry. *Handbook of biomass conversion technologies for developing countries.* U.S. Department of Agriculture, Noviembre 1982. p. 16-17.

[30] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 586-603.

[31] María Varnero. *Manual de biogás.* Ministerio de Energía, Santiago, Chile, 2011. p. 14.

[32] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 583.

[33] Abu Talib, Kathryn Ford, and Jean-Francois Henry. *Handbook of biomass conversion technologies for developing countries.* U.S. Department of Agriculture, Noviembre 1982. p. 16.

[34] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 583.

[35] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 154.

[36] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide to biogas, from production to use.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Alemania, 2012. p. 21.

[37] Susana Gómez. Diseño, construcción y puesta a punto de un biodigestor tubular. Carazo - Nicaragua. Tesis de maestría, Universidad Carlos III de Madrid, Octubre 2012. p. 20.

[38] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 155.

[39] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide to biogas, from production to use.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Alemania, 2012. p. 21.

[40] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 587.

[41] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 154.

[42] María Varnero. *Manual de biogás.* Ministerio de Energía, Santiago, Chile, 2011. p. 19.

[43] Luis Fernández. *Caracterización cinética de la degradación anaeróbica termofílica seca de la FORSU. Efecto de diferentes pretratamientos sobre la biodegradabilidad del residuo.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Marzo 2008. p. II 35.

[44] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 587.

[45] María Varnero. *Manual de biogás.* Ministerio de Energía, Santiago, Chile, 2011. p. 21.

[46] Juana Fernández. *Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Mayo 2010. p. 45.

[47] María Varnero. *Manual de biogás.* Ministerio de Energía, Santiago, Chile, 2011. p. 14.

[48] María Varnero. *Manual de biogás.* Ministerio de Energía, Santiago, Chile, 2011. p. 14.

[49] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide to biogas, from production to use.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Alemania, 2012. p. 21.

[50] Juana Fernández. *Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Mayo 2010. p. 45.

[51] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide to biogas, from production to use.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Alemania, 2012. p. 21.

[52] María Varnero. *Manual de biogás.* Ministerio de Energía, Santiago, Chile, 2011. p. 22.

[53] Juana Fernández. *Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Mayo 2010. p. 48-49.

[54] Juana Fernández. *Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Mayo 2010. p. 56.

[55] Luis Fernández. *Caracterización cinética de la degradación anaeróbica termofílica seca de la FORSU. Efecto de diferentes pretratamientos sobre la biodegradabilidad del residuo.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Marzo 2008. p. II 40.

[56] Susana Gómez. Diseño, construcción y puesta a punto de un biodigestor tubular. Carazo - Nicaragua. Tesis de maestría, Universidad Carlos III de Madrid, Octubre 2012. p. 26.

[57] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide to biogas, from production to use.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Alemania, 2012. p. 26.

[58] Juana Fernández. *Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Mayo 2010. p. 69-70.

[59] Aitor Diaz. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgànicos generados en el mercado de tiquipaya. (bolivia). Tesis de maestría, Escola de Camins, Noviembre 2013. p. 21.

[60] Luis Fernández. *Caracterización cinética de la degradación anaeróbica termofílica seca de la FORSU. Efecto de diferentes pretratamientos sobre la biodegradabilidad del residuo.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Marzo 2008. p. II 42.

[61] Juana Fernández. *Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Mayo 2010. p. 67.

[62] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 596.

[63] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 157.

[64] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide to biogas, from production to use.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Alemania, 2012. p. 23.

[65] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 158.

[66] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide to biogas, from production to use.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Alemania, 2012. p. 23.

[67] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 161.

[68] Juana Fernández. *Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Mayo 2010. p. 51.

[69] Juana Fernández. *Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Mayo 2010. p. 50.

[70] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide to biogas, from production to use.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Alemania, 2012. p. 24.

[71] Juana Fernández. *Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Mayo 2010. p. 51.

[72] Aitor Diaz. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgànicos generados en el mercado de tiquipaya. (bolivia). Tesis de maestría,

Escola de Camins, Noviembre 2013. p. 20.

[73] Aitor Diaz. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgànicos generados en el mercado de tiquipaya. (bolivia). Tesis de maestría, Escola de Camins, Noviembre 2013. p. 21.

[74] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 167.

[75] Luis Fernández. *Caracterización cinética de la degradación anaeróbica termofílica seca de la FORSU. Efecto de diferentes pretratamientos sobre la biodegradabilidad del residuo.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Marzo 2008. p. II 48.

[76] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 163-170.

[77] Luis Fernández. *Caracterización cinética de la degradación anaeróbica termofílica seca de la FORSU. Efecto de diferentes pretratamientos sobre la biodegradabilidad del residuo.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Marzo 2008. p. II 48.

[78] María Varnero. *Manual de biogás.* Ministerio de Energía, Santiago, Chile, 2011. p. 29.

[79] María Varnero. *Manual de biogás.* Ministerio de Energía, Santiago, Chile, 2011. p. 35.

[80] Aitor Diaz. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgànicos generados en el mercado de tiquipaya. (bolivia). Tesis de maestría, Escola de Camins, Noviembre 2013. p. 22.

[81] Edwin Cendales. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Mayo 2011. p. 21.

[82] Juana Fernández. *Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Mayo 2010. p. 60.

[83] Luis Fernández. *Caracterización cinética de la degradación anaeróbica termofílica seca de la FORSU. Efecto de diferentes pretratamientos sobre la biodegradabilidad del residuo.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Marzo 2008. p. II 53.

[84] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide to biogas, from production to use.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Alemania, 2012. p. 26-27.

[85] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide to biogas, from production to use.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Alemania, 2012. p. 28-29.

[86] Edwin Cendales. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Mayo 2011. p. 17.

[87] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaero-

bic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 602.

[88] María Lienqueo. Biogás. BT4551 Energía Renovable a Partir de Biomasa [Material de cátedra], Septiembre 2016. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

[89] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 152-153.

[90] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 602.

[91] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 604.

[92] Aitor Diaz. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgànicos generados en el mercado de tiquipaya. (bolivia). Tesis de maestría, Escola de Camins, Noviembre 2013. p. 24-25.

[93] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide to biogas, from production to use.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Alemania, 2012. p. 33.

[94] Aitor Diaz. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgànicos generados en el mercado de tiquipaya. (bolivia). Tesis de maestría, Escola de Camins, Noviembre 2013. p. 24.

[95] Juana Fernández. *Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Mayo 2010. p. 78.

[96] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide to biogas, from production to use.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Alemania, 2012. p. 23.

[97] Aitor Diaz. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgànicos generados en el mercado de tiquipaya. (bolivia). Tesis de maestría, Escola de Camins, Noviembre 2013. p. 25.

[98] Aitor Diaz. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgànicos generados en el mercado de tiquipaya. (bolivia). Tesis de maestría, Escola de Camins, Noviembre 2013. p. 26.

[99] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 606.

[100] Juana Fernández. *Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Mayo 2010. p. 80.

[101] Aitor Diaz. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgànicos generados en el mercado de tiquipaya. (bolivia). Tesis de maestría, Escola de Camins, Noviembre 2013. p. 24-25.

[102] Satoto Nayono. *Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production.* Tesis doctoral, Universität Karlsruhe, Septiembre 2009. p. 23-30.

[103] Aitor Diaz. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgànicos generados en el mercado de tiquipaya. (bolivia). Tesis de maestría, Escola de Camins, Noviembre 2013. p. 33-37.

[104] Grupo de Residuos Sólidos. Estudio caracterización de residuos sólidos domiciliarios en la región Metropolitana. Technical report, Pontificia Universidad Católica de Valparaiso, 2006.

[105] Thomas Christensen, editor. *Solid Waste Technology & Management*, chapter Anaerobic digestion: Process. John Wiley and Sons, Ltd., Reino Unido, 1st edition, 2011. p. 606.

[106] Juana Fernández. *Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Mayo 2010. p. 80.

[107] Juana Fernández. *Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, Mayo 2010. p. 78.

[108] Jay Cheng. *Biomass to energy.* CRC Press, Estados Unidos, 2010. p. 158.

[109] Antony Njuguna. Waste to energy bio-dogester selection and design model for the organic fraction of the municipal solid waste. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017.

[110] Antony Njuguna. Waste to energy bio-digester selection and design model for the organic fraction of the municipal solid waste. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017.

[111] Prayoon Fongsatitkul. Two-phase anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: estimation of methane production. *Waste management and research*, 2015.

[112] gobierno de España Ministerio de industria, turismo y comercio. Biomasa: Digestores Anaerobios. Technical report, IDAE, 2007.

[113] Aitor Diaz. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgànicos generados en el mercado de tiquipaya. (bolivia). Tesis de maestría, Escola de Camins, Noviembre 2013. p. 44.

[114] Susana Gómez. Diseño, construcción y puesta a punto de un biodigestor tubular.

Carazo - Nicaragua. Tesis de maestría, Universidad Carlos III de Madrid, Octubre 2012. p. 29.

[115] Víctor Velayos. Valor actual neto (van). [en línea] <https://economipedia.com/definiciones/valor-actual-neto.html>, Junio 2014. [consulta: 4 enero 2019].

[116] CNE. Precio del gas natural. [en línea] <https://www.cne.cl/estadisticas/hidrocarburo/>, 2018. [consulta: 15 enero 2019].

[117] Enel. Tarifas peaje distribución enero 2019. [en línea] <https://www.enel.cl/es/clientes/informacion-util/tarifas-y-reglamentos/tarifas.html>, 2019. [consulta: 15 enero 2019].

[118] Miguel Concha. Precio del gas natural para hogares de santiago cae 24 % en mayo. [en línea] <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=109318>, Junio 2013. [consulta: 2 noviembre 2018].

[119] Lissethy Hernández-Nazario. Caracterización físico-química de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos del vertedero controlado en el Centro Urbano Abel Santamaría de Santiago de Cuba. *Centro de Energías*, 2018.

[120] Jorge Restrepo. *Código API 650 Y 653: Diseño, Montaje y Construcción de Tanques Soldados de acero*. Elite Training, Bogotá, Colombia, Noviembre 2007.

[121] Jorge Restrepo. *Código API 650 Y 653: Diseño, Montaje y Construcción de Tanques Soldados de acero*. Elite Training, Bogotá, Colombia, Noviembre 2007.

[122] Diseño de tanques de almacenamiento. [en línea] <https://www.ugr.es/~aulavirtualpfciq/descargas/documentos/Disenio_Tanques_Almacenamiento.pdf>. [consulta: 14 enero 2019].

[123] James Farr. *Guidebook for de design of ASME Section VIII pressure vessels*. ASME, Nueva York, Julio 2001. p. 66.

[124] James Farr. *Guidebook for de design of ASME Section VIII pressure vessels*. ASME, Nueva York, Julio 2001. p. 66.

[125] NKS. Acero inoxidable 304 y 304l. [en línea] <https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/acero-inoxidable-304/>. [consulta: 14 enero 2019].

[126] Aceros Otero. Planchas de acero inoxidable aisi 304 / aisi 304l. [en línea] <http://www.acerosotero.cl/planchas_acero_inoxidable_aisi_304_304l.html>. [consulta: 14 enero 2019].

[127] ASME, Nueva York. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, section 8 rules for construction of pressure vessels*, Julio 2013. p. 13.

[128] Shinji Nagata. *Mixing, principles and aplications*. Kodansha Ltd., Japon, 1975. p. 24.

[129] Vladimir Castillo. Diseño y cálculo de un agitador de fluidos. Tesis de maestría, Universidad del Bio-Bio, Octubre 2013. p. 30.

[130] NKS. Acero inoxidable 304 y 304l. [en línea] <https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/acero-inoxidable-304/>. [consulta: 14 enero 2019].

[131] Shinji Nagata. *Mixing, principles and aplications*. Kodansha Ltd., Japon, 1975. p. 270.

[132] Shinji Nagata. *Mixing, principles and aplications*. Kodansha Ltd., Japon, 1975. p. 270-275.

[133] Volcan. Aislan. [en línea] <http://cymsanpascual.cl/wp-content/uploads/2014/05/modificado-triaaptico-aislan-lana-mineral.pdf>. [consulta: 14 enero 2019].

[134] Irene DePaul. Coeficiente de transferencia convectiva h en el interior de un destilador tipo batea. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2017.

[135] Irene DePaul. Estudio experimental de la transferencia de energía por convección natural en recintos cerrados empleando modelos a varias escalas. Technical report, UNSa, 2000.

[136] Goodfellow. Acero inoxidable AISI 304. [en línea] <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-304.html>. [consulta: 14 enero 2019].

[137] AAMSA. Placa A36. [en línea] <http://www.aamsa.com/productos/placa/placa-a-36/>. [consulta: 14 enero 2019].

[138] Sumitec. Acero estructural, acero ASTM A36. [en línea] <http://www.sumiteccr.com/acero/estructural/AE01.pdf>. [consulta: 14 enero 2019].

[139] Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Santiago, Chile. *Diseño sismico de componentes y sistemas no estructurales*, 2013. p. 63.

[140] Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Santiago, Chile. *Diseño sismico de componentes y sistemas no estructurales*, 2013. p. 20.

[141] Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Santiago, Chile. *Diseño sismico de componentes y sistemas no estructurales*, 2013. p. 27.

[142] Decreto supremo 61, 2011. [en línea] <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1034101&idVersion=2011-12-13>. [consulta: 14 enero 2019].

[143] Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile. *Diseño sísmico de edificios*, 2009. p. 15.

Apéndice A

Código Stata

```

////////////////////////////////////////////////////////////
//////////////////Codigo Datos Casen//////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////


clear all
use "C:\Casen 2017.dta", clear

keep folio id_vivienda expr expc numper comuna v1 v8 v20 v22 v24
v28 v36a v36b v36c v39f
save reduccion.dta, replace

////////////////////////////////////////////////////////////
//Identificacion de hogares, viviendas y viviendas por sitio//
////////////////////////////////////////////////////////////


keep id_vivienda folio expr v8 v28
duplicates drop

sum folio [w=expr]
//Conteo de hogares
drop folio
sort id_vivienda
//Identificacion viviendas repetidas
quietly by id_vivienda: gen aux = cond(_N==1,0,_n)
//Identificacion viviendas repetidas
drop if aux>1
//Eliminacion viviendas repetidas
sum id_vivienda [w=expr]
//Conteo de viviendas
tab v8 [w=expr]
//Distribucion de viviendas por sitio
tab v28 [w=expr]
//Distribucion de hogares por vivienda

////////////////////////////////////////////////////////////
///////////////Cantidad de Personas por Hogar///////////////
```

```
////////////////////////////////////////////////////////////


clear all
use reduccion
keep folio expr numper
drop if numper==.
duplicates drop
tab numper [w=expr]

//////////////////////////////////////////////////////////////
/////Cantidad de Personas por CASA y Variables de Interes/////
//////////////////////////////////////////////////////////////


clear all
use reduccion
sort id_vivienda
//Identificacion viviendas repetidas
quietly by id_vivienda: gen aux = cond(_N==1,0,_n)
//Identificacion viviendas repetidas
drop if aux>1
//Eliminacion viviendas repetidas
tab v1 [w=expr]
//Identificacion de viviendas que son casas
keep if v1==1 | v1==2 | v1==3
//Dejar solo CASAS
tab numper [w=expr]
// Conteo de personas por CASA
tab v20 [w=expr]
//De donde viene el agua?
tab v22 [w=expr]
//Cual es el sistema de distribucion de agua?
tab v24 [w=expr]
//Hay energia electrica?
tab v36a [w=expr]
//Combustible para cocinar
tab v36b [w=expr]
//Combustible calefaccion
tab v36c [w=expr]
//Combustible agua caliente
tab v39f [w=expr]
//Presencia de basura en las calles


//////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////Desagragacion Socioeconomica/////////////////
//////////////////////////////////////////////////////////////


// Cantidad de personas en el hogar
clear all
use reduccion
keep folio expc numper comuna
drop if numper==.
duplicates drop
```

```
tab numper [w=expc] if comuna==13132 | comuna==13123
//Vitacura y Providencia
tab numper [w=expc] if comuna==13101 | comuna==13110
//Santiago y La Florida
tab numper [w=expc] if comuna==13126 | comuna==13106 | comuna==13201
//Quinta Normal, Estacion Central y Puente Alto
tab numper [w=expc] if comuna==13112 | comuna==13131 | comuna==13122
//La Pintana, San Ramon y Penalolen
tab numper [w=expc] if comuna==13502
//Alhue

// Tipo de vivienda por GSE
clear all
use reduccion
sort id_vivienda
quietly by id_vivienda: gen aux = cond(_N==1,0,_n)
drop if aux>1
tab v1 [w=expc] if comuna==13132 | comuna==13123
//Vitacura y Providencia
tab v1 [w=expc] if comuna==13101 | comuna==13110
//Santiago y La Florida
tab v1 [w=expc] if comuna==13126 | comuna==13106 | comuna==13201
//Quinta Normal, Estacion Central y Puente Alto
tab v1 [w=expc] if comuna==13112 | comuna==13131 | comuna==13122
//La Pintana, San Ramon y Penalolen
tab v1 [w=expc] if comuna==13502
//Alhue



keep if v1==1 | v1==2 | v1==3
//Se dejan solo las casas

// Conteo de personas por CASA por GSE
tab numper [w=expc] if comuna==13132 | comuna==13123
tab numper [w=expc] if comuna==13101 | comuna==13110
tab numper [w=expc] if comuna==13126 | comuna==13106 | comuna==1320
tab numper [w=expc] if comuna==13112 | comuna==13131 | comuna==13122
tab numper [w=expc] if comuna==13502

//V20 De donde viene el agua
tab v20 [w=expc] if comuna==13132 | comuna==13123
tab v20 [w=expc] if comuna==13101 | comuna==13110
tab v20 [w=expc] if comuna==13126 | comuna==13106 | comuna==1320
tab v20 [w=expc] if comuna==13112 | comuna==13131 | comuna==13122
tab v20 [w=expc] if comuna==13502

//V22 Distribucion de Agua
tab v22 [w=expc] if comuna==13132 | comuna==13123
tab v22 [w=expc] if comuna==13101 | comuna==13110
tab v22 [w=expc] if comuna==13126 | comuna==13106 | comuna==1320
tab v22 [w=expc] if comuna==13112 | comuna==13131 | comuna==13122
tab v22 [w=expc] if comuna==13502

//V24 Hay energia electrica?
tab v24 [w=expc] if comuna==13132 | comuna==13123
```

```
tab v24 [w=expc] if comuna==13101 | comuna==13110
tab v24 [w=expc] if comuna==13126 | comuna==13106 | comuna==1320
tab v24 [w=expc] if comuna==13112 | comuna==13131 | comuna==13122
tab v24 [w=expc] if comuna==13502

//V36A Combustible para cocinar
tab v36a [w=expc] if comuna==13132 | comuna==13123
tab v36a [w=expc] if comuna==13101 | comuna==13110
tab v36a [w=expc] if comuna==13126 | comuna==13106 | comuna==1320
tab v36a [w=expc] if comuna==13112 | comuna==13131 | comuna==13122
tab v36a [w=expc] if comuna==13502

//V36B Combustible para calefaccionar
tab v36b [w=expc] if comuna==13132 | comuna==13123
tab v36b [w=expc] if comuna==13101 | comuna==13110
tab v36b [w=expc] if comuna==13126 | comuna==13106 | comuna==1320
tab v36b [w=expc] if comuna==13112 | comuna==13131 | comuna==13122
tab v36b [w=expc] if comuna==13502

//V36C Combustible para agua caliente
tab v36c [w=expc] if comuna==13132 | comuna==13123
tab v36c [w=expc] if comuna==13101 | comuna==13110
tab v36c [w=expc] if comuna==13126 | comuna==13106 | comuna==1320
tab v36c [w=expc] if comuna==13112 | comuna==13131 | comuna==13122
tab v36c [w=expc] if comuna==13502

//V39f Presencia de Basura en las Calles
tab v39f [w=expc] if comuna==13132 | comuna==13123
tab v39f [w=expc] if comuna==13101 | comuna==13110
tab v39f [w=expc] if comuna==13126 | comuna==13106 | comuna==1320
tab v39f [w=expc] if comuna==13112 | comuna==13131 | comuna==13122
tab v39f [w=expc] if comuna==13502
```

Apéndice B

Memoria de Cálculo Subsistema Alimentación

Para el cálculo de la cantidad de agua necesaria se utilizan los siguientes parámetros:

x_p	=	Cantidad de personas.
$\dot{m}_{BPP}$	=	Cantidad de basura por persona $[kg/hab/\mathrm{dia}]$.
$\%ST_B$	=	Sólidos totales de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales $[\,\%]$.

Se impone que $ST_{mezcla} = ST_B$ y se asume $\%ST_{agua} = 0$, obteniendose:

$$\%ST_{mezcla} \cdot [\dot{m}_{BPP} \cdot x_p + \dot{m}_{agua}] = \%ST_B \cdot \dot{m}_{total}$$

Despejando $\dot{m}_{agua}$:

$$\dot{m}_{agua} = \frac{\%ST_B}{\%ST_{mezcla}} \cdot \dot{m}_{BPP} \cdot x_p - \dot{m}_{BPP} \cdot x_p$$

Luego, se fija $\%ST_{mezcla} = 12\,\%$ para asegurar una mezcla con sólidos totales en el rango húmedo y se toma $\%ST_b = 32,3\,\%$. Además, de la Tabla 5.5 se obtiene el valor promedio de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, $\dot{m}_{BPP} = 0,59$. Se asumen 5 personas por vivienda.

Finalmente, se obtiene como resultado:

$$\dot{m}_{agua} = 4,99[kg/\mathrm{dia}]$$

Considerando la densidad del agua como $\rho_{agua} = 1000[kg/m^3]$ se obtiene que la cantidad de agua necesaria en volumen que debe ser mezclada con cada ingreso es de:

$$V_{agua} = 4,99[l/\text{dia}]$$

Para el cálculo de densidad de la mezcla, se emplea:

$$\rho_{mezcla} = \frac{m_{mezcla}}{V_{mezcla}}$$

Donde:

m_{mezcla} = Masa de basura más masa de agua.
V_{mezcla} = Volumen de basura más volumen de agua no retenida.

El volumen de basura se calcula como el cociente entre la masa de basura y su densidad:

$$V_{basura} = \frac{m_{basura}}{\rho_{basura}}$$

El volumen de agua no retenida (V_{ANR}) se calcula en base a la capacidad de retención de agua de la basura (C_R), según:

$$V_{ANR} = V_{agua} - \frac{C_R \cdot \dot{m}_{BPP} \cdot x_p}{\rho_{agua}}$$

Finalmente, reemplazando por los valores ya estipulados, se obtiene que:

$$\rho_{mezcla} = 863,04[kg/m^3]$$

Apéndice C

Memoria de Cálculo Subsistema Reactor

C.1. Cálculo de Dimensiones

Las dimensiones del reactor se definen según la Figura C.1.

El volumen del ractor va a ser la suma de los volúmenes de cada parte:

$$V_{cono} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h \cdot \left(\frac{D^2}{4} + \frac{\mathrm{d}^4}{4} + \frac{D \cdot \mathrm{d}}{4} \right)$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{4}$$

$$V_{elipsoide} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h}{6}$$

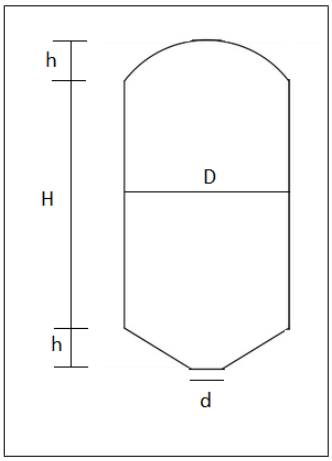


Figura C.1: Dimensiones del Reactor (Elaboración Propia).

Finalmente, siguiendo las relaciones impuestas por el estándar API 650, mostradas en la Tabla C.1, y fijando un volumen útil de 0,5 m^3, se despejan las dimensiones finales y se aproximan para quedar en valores cómodos de construir sin perder capacidad de mezcla. Las dimensiones que no se encuentran afectadas por los alcances de API 650 se fijan de manera arbitraria.

Tabla C.1: Relaciones de Medida.

Parámetro	**Relación**
D	$2/3H$
h	$H/4$

Con estas condiciones se obtiene:

H	=	1,2	[m]
h	=	0,2	[m]
D	=	0,8	[m]
d	=	0,4	[m]

Lo que da para cada reactor un volumen total y un volumen útil, correspondiente al 80 % del volumen total, de:

$$V_{total} = 0,711[m^3]$$

$$V_{util} = 0,56[m^3]$$

C.2. Cálculo del Espesor

Para el cálculo del espesor, el reactor debe resistir la mayor presión de trabajo. Para esto, se asume una carga completa, además, éste se modela como un cilindro recto de la misma altura que el reactor, con el objetivo de facilitar los cálculos, sin perder la validez de los resultados obtenidos.

La máxima presión de trabajo del líquido se obtiene según:

$$P = \rho_{mezcla} \cdot g \cdot (H + h + h)$$

Con $\rho = 863,04[kg/m^3]$, $g = 10[m/s^2]$, $H = 1,2[m]$ y $h = 0,2[m]$.

$$P = 13808[Pa]$$

Luego, es necesario que el cilindro resista esfuerzos tangenciales y longitudinales, definidos según:

$$\sigma_t = \frac{P \cdot r}{\mathrm{e}}$$
$$\sigma_l = \frac{P \cdot r}{2 \cdot \mathrm{e}}$$

Con los siguientes parámetros:

P	=	Máxima presión de trabajo $[Pa]$.
r	=	Radio del reactor $[m]$.
e	=	Espesor de la carcaza $[m]$.
σ_t	=	Esfuerzo tangencial $[Pa]$.
σ_l	=	Esfuerzo longitudinal $[Pa]$.

El esfuerzo equivalente se puede calcular según:

$$\sigma_{\mathrm{eq}} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_l^2 - \sigma_t \cdot \sigma_l}$$

Y se debe fijar que éste último sea menor o igual que el esfuerzo de fluencia del material σ_{ut}:

$$\sigma_{\mathrm{eq}} \leq \sigma_{ut}$$

Finalmente, despejando el valor de espesor, se obtiene:

$$\mathrm{e} \geq 0,028[mm]$$

Apéndice D

Memoria de Cálculo Subsistema Agitador

D.1. Velocidad de Giro

La velocidad de giro necesaria para asegurar una suspensión total de las particulas se calcula según:

$$N_f = K \cdot D^{-2/3} \cdot \mathrm{d}_p^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\rho_l}\right)^{-1/9} \cdot r^{0,7}$$

Donde:

N_f	=	Velocidad de giro [RPM].
r	=	Parámetro de corrección.
K	=	Constante de proporcionalidad.
d_p	=	Diámetro de partícula [mm].
μ	=	Viscosidad del fluido [cP].
ρ_l	=	Densidad del líquido [g/cm^3].
ρ_s	=	Densidad del sólido [g/cm^3].

Finalmente, reemplazando, se obtiene que:

$$N_f = 287,29[RPM]$$

D.2. Potencia Requerida

La potencia requerida se calcula, en caso de ser un flujo turbulento, según:

$$P = K_t \cdot N_f^3 \cdot \mathrm{d}^5 \rho$$

Por lo que se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{N_f \cdot \mathrm{d}^2 \cdot \rho}{\mu}$$

Donde:

N_f = 4,78 $[rps]$
d = 0,25 $[m]$
ρ_{agua} = 1000 $[kg/m^3]$
μ = 0,001 $[Pa \cdot s]$

Se obtiene un valor de Re=298750, por lo que se tiene flujo turbulento. Luego, dado que el flujo es turbulento, basta tomar el valor de $K_t = 4$ y se obtiene el valor de la potencia requerida:

$$P = 426,62[W]$$

D.3. Velocidad Crítica

P = 1 $[HP]$
RPM = 360 $[RPM]$

Para el cálculo de la velocidad crítica, se calcula el torque en el eje:

$$T = \frac{71600 \cdot 1[HP]}{360[RPM]} = 198,88 \sim 199[kg\ cm]$$

Luego, se calcula la fuerza horizontal que se genera en la turbina:

$$F_h = \frac{8550 \cdot 1[HP]}{360[RPM] \cdot 25[cm]} = 0,95[kg]$$

Una vez obtenida la fuerza transversal, es posible calcular el momento flector:

$$M = 0,95[kg] \cdot 25[cm] = 23,75[kg\ cm]$$

$$\sigma_{ad} = \frac{2040[kg/cm^2]}{1,6} = 1275[kg/cm^2]$$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_{\mathrm{e}}} = \frac{2600[kg/cm^2]}{2040[kg/cm^2]} = 1,275$$

Luego,

$$\mathrm{d} = \left\{ \frac{32}{\pi\sigma_{\mathrm{ad}}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{\mathrm{e}}} \cdot k_s \cdot k_f \cdot M\right)^2 + (k_s \cdot k_f \cdot T)^2} \right\}^{1/3}$$

Usando $k_s = 1,25$, $k_f = 1,5$ y reemplazando:

$$\Rightarrow \mathrm{d} = 0,45[cm]$$

Para el cálculo de la velocidad crítica se calcula la masa y la frecuencia de giro:

$$W = [4 \cdot (l \cdot b \cdot \mathrm{e}) + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \mathrm{e}] \cdot \rho$$

$$\Rightarrow w = 2,05[kg]$$

Luego,

$$f = \frac{2,05[kg] \cdot 25[cm]^2 \cdot (25+25)[cm]}{3 \cdot 2100000 \cdot \left(\frac{\pi \mathrm{d}^4}{64}\right)} = \frac{0,207}{\mathrm{d}^4}$$

Con la primera frecuancia natural como:

$$N_1 = \frac{30}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{980[cm/s^2]}{\frac{0,207}{\mathrm{d}^4}}}$$

Basta despejar el diámetro:

$$\Rightarrow \mathrm{d}^4 = \frac{0,207}{980[cm/a^2]} \cdot \left(\frac{360[RPM] \cdot \pi}{30}\right)^2$$

Finalmente, el diámetro mínimo para no colapsar a la velocidad crítica es:

$$\mathrm{d} = 0,74[cm]$$

Apéndice E

Memoria de Cálculo Subsistema Calefacción

Para el cálculo de la potencia térmica necesaria para mantener el sistema a la temperatura deseada se considera que la potencia entregada debe ser igual a la potencia perdida. Es decir:

$$\dot{Q}_{\text{in}} = \dot{Q}_{out}$$

Además se considera un cilindro recto para facilitar los cálculos, considerando el diámetro como el diámetro máximo del reactor, y la altura como la altura total del reactor. Los parámetros necesarios para obtener el resultado son:

r_1	=	Radio interno [m].
r_2	=	Radio medio [m].
r_3	=	Radio exterior [m].
$T_{\infty 1}$	=	Temperatura interior [°C].
$T_{\infty 2}$	=	Temperatura exterior [°C].
k_{acero}	=	Coeficiente de conductividad térmica del acero $[W/m°C]$.
k_{lana}	=	Coeficiente de conductividad térmica de la lana mineral $[W/m°C]$.
h_1	=	Coeficiente convectivo interno $[W/m^2°C]$.
h_2	=	Coeficiente convectivo externo $[W/m^2°C]$.

Se considera r_2 como el radio externo del reactor, correspondiente a 0,4 [m]. El radio interno tiene una diferencia de 3 [mm] hacia el interior y el radio exterior considera 1 [cm] de lana mineral hacia el exterior. La temperatura interior se fija en 35°C y la exterior en 3°C, considerando el caso más conservador.

Para el cálculo de la potencia entregada se utiliza el método de la resistencia térmica, según:

$$\dot{Q}_{\text{in}} = \dot{Q}_{out} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}}$$

La resistencia total se calcula como la suma de la resistencia térmica de cada una de las secciones. Para eso, se calcula la resistencia térmica de cada una de las secciones según las siguientes ecuaciones:

$$R_{\text{in}} = R_{conv,1} = \frac{1}{h_1 \cdot A_{\text{int}}} = 0,0056$$

$$R_1 = R_{acero} = \frac{ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot L} = 0,000018$$

$$R_2 = R_{lana} = \frac{ln(r_3/r_2)}{2 \cdot \pi \cdot k_2 \cdot L} = 0,058$$

$$R_{out} = R_{conv,1} = \frac{1}{h_2 \cdot A_{\text{ext}}} = 0,1213$$

Luego, la resistencia total $R_{total} = \sum R_{\text{i}} = 0,1849[°C/W]$. Finalmente, reemplazando los valores correspondientes, se tiene que:

$$\dot{Q} = 173,07[W]$$

Apéndice F

Memoria de Cálculo Subsistema Soporte

F.1. Peso del Equipo

El cálculo de la masa de la mezcla se realiza asumiendo un llenado total del reactor, es decir:

$$M_{mezcla} = 2 \cdot V_{total} \cdot \rho_{mezcla}$$

$$M_{mezcla} = 1227,24[kg]$$

La masa de los reactores se calcula mediante la obtención del volumen de material necesario para fabricarlos.

$$V_{mat_cilindro} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{4} - \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot \mathrm{e})^2 \cdot H}{4}$$

$$\Rightarrow V_{mat_cilindro} = H \cdot \pi \cdot (D \cdot \mathrm{e} - \mathrm{e}^2)$$

$$\begin{aligned} V_{mat_cono} &= \left\{ \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h \cdot \left(\frac{D^2}{4} + \frac{\mathrm{d}^4}{4} + \frac{D \cdot \mathrm{d}}{4} \right) \right\} \\ &- \left\{ \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h \cdot \left(\frac{(D - 2\mathrm{e})^2}{4} + \frac{(\mathrm{d} - 2\mathrm{e})^4}{4} + \frac{(D - 2\mathrm{e}) \cdot (\mathrm{d} - 2\mathrm{e})}{4} \right) \right\} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow V_{mat_cono} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot h \left(D\mathrm{e} + \mathrm{de} - 2\mathrm{d}^2 \right)$$

$$V_{mat_elipsoide} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h}{6} - \left\{ \frac{\pi \cdot (D - 2\mathrm{e})^2 \cdot (h - \mathrm{e})}{6} \right\}$$

$$\Rightarrow V_{mat_elipsoide} = \frac{\pi}{6} \cdot \left[D^2 h - (D^2 - 4D\mathrm{e} + 4\mathrm{e}^2)(h - \mathrm{e}) \right]$$

Reemplazando los valores correspondientes por los de la Tabla 6.1, y el valor de e por 3[mm], se obtiene que el volumen total de un reactor es de aproximadamente:

$$V_{mat_reactor} = 0,012[m^3]$$

Luego, para calcular la masa total de los reactores:

$$M_{reactores} = 2 \cdot V_{mat_reactor} \cdot \rho_{304L}$$

$$M_{reactores} = 190,32[kg]$$

El cálculo de la masa de los componentes extra se estima en $100[kg]$, por lo que:

$$M_{componentes} = 100[kg]$$

Para la masa de los perfiles, se estima que son necesarios $41,92[m]$. Además, se calcula el área transversal de los perfiles de ángulo de $50x50[mm]$ de $3[mm]$ de espesor en $A_T = 0,000291[m^2]$.

Con esto, la masa del conjunto de perfiles se puede calcular según:

$$M_{perfiles} = A_T \cdot L_T \cdot \rho_{A36}$$

$$M_{perfiles} = 95,88[kg]$$

Con esto se obtiene que, el peso soportado por los elementos críticos P_1 es de:

$$P_1 = (M_{mezcla} + M_{reactores} + M_{componentes}) \cdot g$$

$$P_1 = 14872,1[N]$$

Y el peso total del equipo P_2 es:

$$P_2 = (M_{mezcla} + M_{reactores} + M_{componentes} + M_{perfiles}) \cdot g$$

$$P_2 = 15811,7[N]$$

F.2. Pandeo en Elementos Críticos

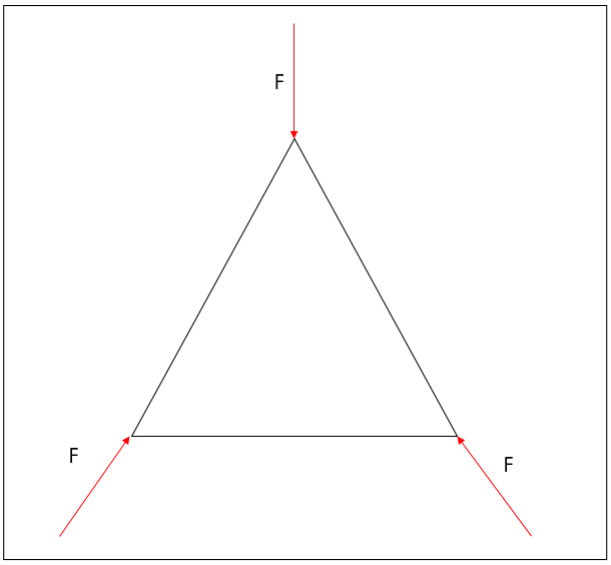


Figura F.1: Esquema de Elementos Críticos (Elaboración Propia).

A partir del esquema mostrado en la Figura F.1, se puede hacer un análisis isostático para determinar la fuerza necesaria para que los elementos fallen. Dado que son barras rectas, en reposo, sometidas a sólo dos fuerzas, estas fuerzas deben ser colineales. Con esto, es posible determinar que la fuerza crítica para que fallen por pandeo debe ser:

$$F_{crit} \geq \pi^2 \frac{E \cdot I}{L^2}$$

Donde:

F_crit = Fuerza máxima aplicada igual a $1,5 \cdot 2 \cdot P_1[N]$.
E = Módulo de Young [GPa].
L = Largo de las barras [m].

Despejando el valor de I, se obtiene que:

$$I_{crit} \geq 2542,82[mm^4]$$

F.3. Fuerza Sísmica

La norma técnica del Minvu 001 establece que la fuerza que debe soportar un equipo no estructural no requiere ser mayor que:

$$F_p = \frac{1,6 \cdot \alpha_A A \cdot I_p \cdot W_p}{g}$$

Donde:

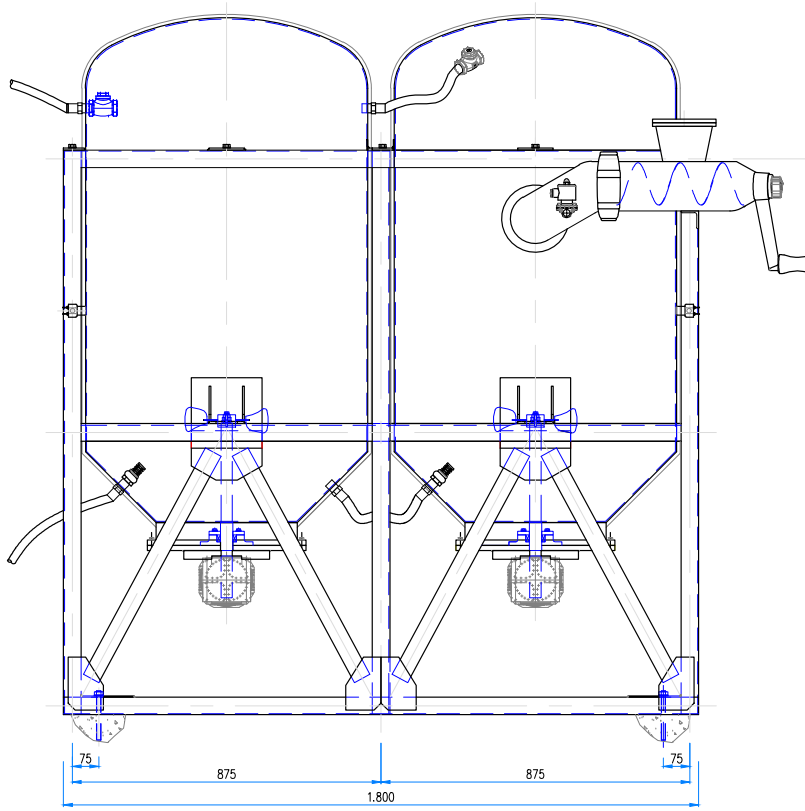
$\alpha_A A$	=	Parámetro del espectro de pseudo aceleración de diseño, correspondiente a 977z $[cm/s^2]$.
z	=	Parámetro asociado a zona sísmica, para la Regíon Metropolitana corresponde a 0,75.
I_p	=	Factor de importancia del componente, al ser inflamable, se toma 1,5.
W_p	=	Peso del componente, de 15811,7 [N].

Finalmente, reemplazando los valores, se obtiene que F_p debe ser:

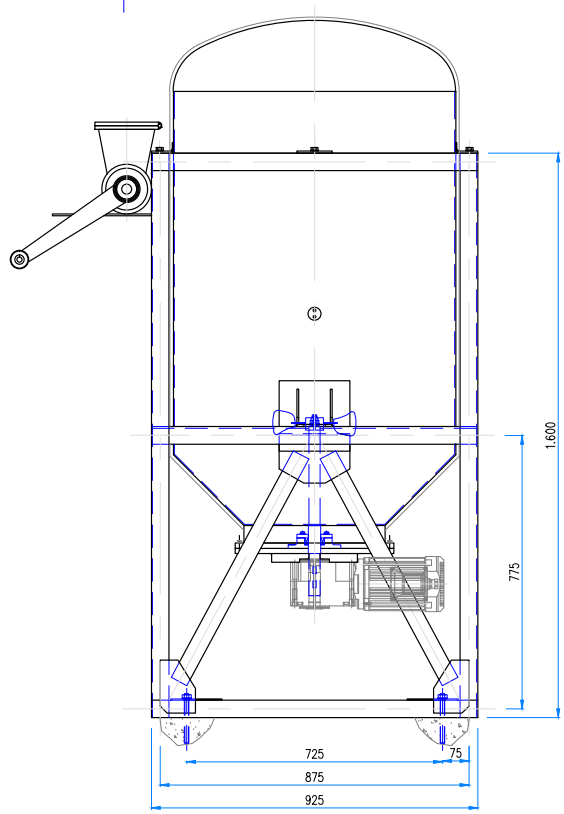
$$F_p = 28373,9[N]$$

Apéndice G

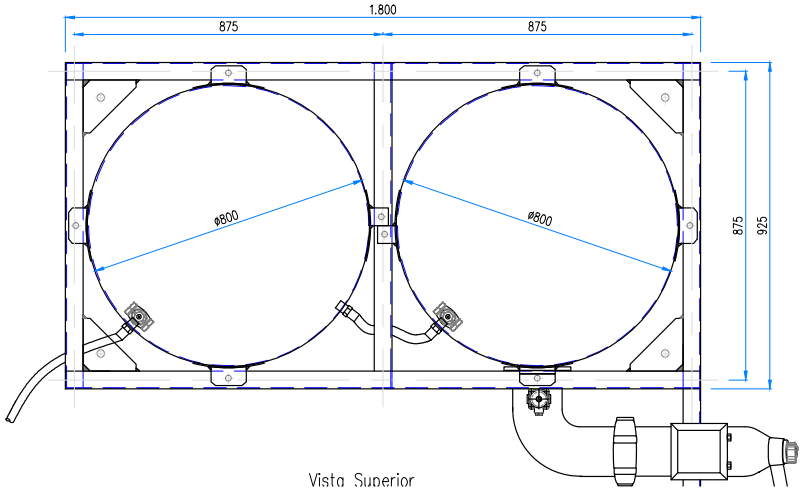
Planos de Conjunto



Vista Frontal
Esc. 1:10



Vista Lateral
Esc. 1:10

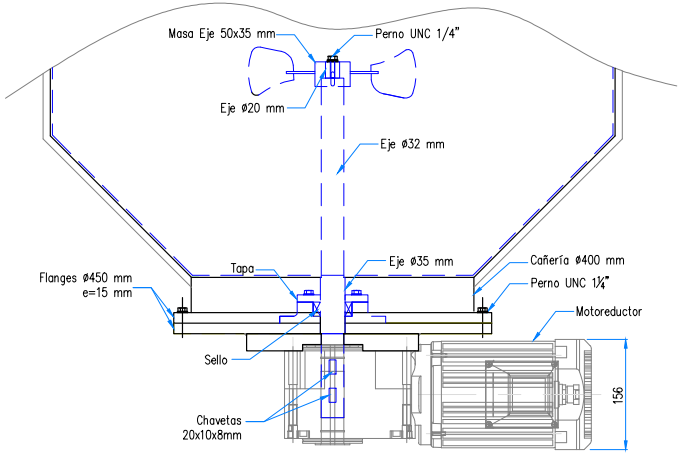


Vista Superior

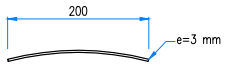
				PROYECTO: Diseño Conceptual de un Biodigestor	
				DESCRIPCION: Para la producción de biogas a nivel residencial	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ESCALA: INDICADAS	CÓDIGO PROY: JR-BG-01 / LAMINA: 01
PROYECTO	J.R.		31/10/2018		
DIBUJO	V.O.		31/10/2018		PLANO N° JR-BG-01-01 / REV. A
REVISO	L.N.		31/10/2018		
APROBO	L.N.		31/10/2018	FORMATO: A3	

Apéndice H

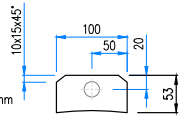
Planos de Detalle



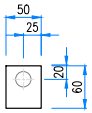
MOTOREDUCTOR Y AGITADOR
Esc. 1:10



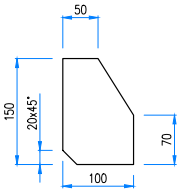
PLACA SUPERIOR CILINDRO
PL 200x30mm Esc. 1:5
e=3 mm
ASTM A-36
08 Unidades



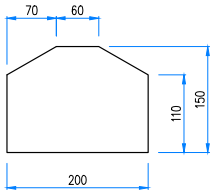
PLACA SUPERIOR
PL 100x53 mm Esc. 1:5
e=6 mm
ASTM A-36
08 Unidades



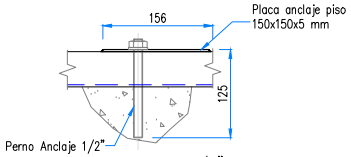
PLACA SUP. INTERMEDIA
PL 50x50 mm Esc. 1:5
e=6 mm
ASTM A-36
02 Unidades



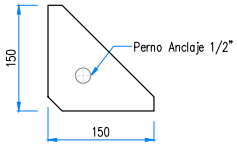
PLACA GUSSET PERFILES
PL 150x150x3 mm Esc. 1:5
ASTM A-36
08 Unidades



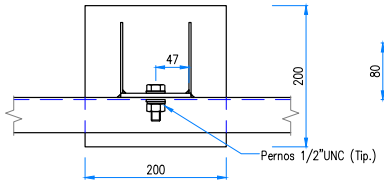
PLACA CENTRAL PERFILES
PL 200x150x3 mm Esc. 1:5
ASTM A-36
04 Unidades



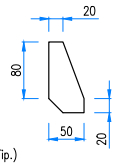
PERNO ANCLAJE 1/2"
L= 125 mm Esc. 1:5
ASTM A-36
04 Unidades



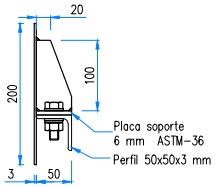
PLACA ANCLAJE A PISO
PL 150x150x5 mm
ASTM A-36 Esc. 1:5
04 Unidades



SOPORTE A BASTIDOR
PL 200x300x5 mm Esc. 1:5
ASTM A-36
02 Unidades



PLACA SOPORTE TAMBOR
PL 100x150x3 mm Esc. 1:5
ASTM A-36
08 Unidades



PLACA A CILINDRO
PL 200x300x5 mm Esc. 1:5
ASTM A-36
02 Unidades

				PROYECTO: Diseño Conceptual de un Biodigestor		
				DESCRIPCION	Para la producción de biogas a nivel residencial	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ESCALA: INDICADAS	CÓDIGO PROY: JR-BG-01	LAMINA: 01
PROYECTO	J.R.		31/10/2018			
DIBUJO	V.O.		31/10/2018		PLANO N° JR-BG-01-01	REV. A
REVISO	L.N.		31/10/2018			
APROBO	L.N.		31/10/2018	FORMATO: A3		