



Universidad del Bío-Bío
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería en Maderas
Escuela Ingeniería Civil Química



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIORREACTOR
AGITADO DE BAJO COSTO PARA ESTUDIOS DE
DIGESTIÓN ANAERÓBICA A ESCALA DE
LABORATORIO.**

Informe de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos
para obtener el título de Ingeniero Civil Químico

PABLO ANDRES MARTIN ALBI.

Profesora Tutora: Dra. Paola Bustos Gutiérrez.

Concepción, 28 de septiembre de 2020

RESUMEN

La generación de residuos orgánicos ha mostrado un aumento acelerado a nivel mundial. En Chile, los residuos orgánicos constituyen, según el ministerio del medio ambiente, el 58% de los residuos totales, siendo aprovechados apenas el 1% de estos. El proceso de digestión anaeróbica permite reutilizar residuos orgánicos buscando producir biogás con el fin de producir energía limpia y bioabono como productos con valor agregado, presentándose como una alternativa atractiva para producción energética limpia y el reaprovechamiento de residuos. En el país solo 6 empresas destinadas al tratamiento de RILes utilizan el proceso de digestión anaerobia, las que produjeron 68,2 millones de metros cúbicos de biogás durante el año 2018. La aplicación de esta tecnología ha sido lenta, debido a que las investigaciones realizadas no han profundizado en su totalidad el proceso, faltando así mayor conocimiento del mismo para mejorar la relación costo/beneficio de la tecnología. Lo anterior es principalmente debido al elevado costo de los equipos requeridos para el área de investigación. Es por esta razón, que el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la factibilidad de construcción de un biorreactor agitado de bajo costo para estudios de digestión anaerobia a escala de laboratorio, esperando con ello, facilitar el acceso a esta tecnología con el fin de aumentar la eficiencia del proceso. El estudio consideró tres factores esenciales a la hora de diseñar y construir el equipo, los cuales fueron el recipiente, el sistema de agitación y el sistema de calefacción. El tanque digestor fue construido con acero inoxidable 304, del tipo cilíndrico vertical, con un volumen total de 7,4 litros. El sistema de calefacción consistió en un serpentín externo, fabricado con cobre recocido de 3/8'' de diámetro, el cual se recubrió de plancha aislante de 3 milímetros para evitar pérdidas de calor hacia el ambiente. El sistema de agitación consideró un agitador de tipo helicoidal de 7,7 centímetros de diámetro por 15,9 centímetros de largo, útil para la homogeneización de fluidos viscosos como es el caso de las mezclas líquidas con alto contenido de materia orgánica. El equipo en su totalidad tuvo un costo de 8 UF, siendo este un valor equivalente al 0,5% del valor de mercado de un equipo similar. Las pruebas de funcionamiento del equipo no se realizaron debido a falta de equipos esenciales para su propósito. El estudio demostró que el diseño y construcción de un equipo a escala laboratorio de bajo costo es factible.

ABSTRACT.

The generation of organic waste has shown an accelerated increase worldwide. In Chile, organic waste constitutes 58% of total waste according to Chile's Ministry of the Environment. From this, only 1% of it is being used. The anaerobic digestion process allows for the reuse of organic waste in order to produce biogas, which produces clean energy and bio-fertilizers as value-added products. Thus, bio-gas presents itself as an attractive alternative for clean energy production and for the reuse of waste. Furthermore, there's only 6 companies destined to the treatment of industrial liquid waste in Chile that use the anaerobic digestion process, which produced 68.2 million cubic meters of biogas in 2018. The application of this technology has been slow, mainly due to investigations carried out, which have not fully deepened into the process and thus lack knowledge in order to improve the cost / benefit ratio. The latter is due to the high equipment cost required for research. Thus, the present study aimed to evaluate the feasibility of building a low-cost agitated bioreactor for laboratory-scale anaerobic digestion studies. The latter hoped to facilitate access to this technology in order to increase efficiency. The study considered three essential factors when designing and building the equipment: the container, the stirring system and the heating system. The digester tank was built using 304 stainless steel, vertical cylindrical type, with a total volume of 7.4 liters. The heating system consisted of an external coil, made of 3/8" diameter annealed copper, which was covered with a 3 millimeters insulating sheet to avoid heat losses to the environment. The stirring system considered a helical-type stirrer of 7.7 centimeters in diameter by 15.9 centimeters long, useful for homogenizing viscous fluids such as liquid mixtures with a high content of organic matter. The equipment as a whole had a cost of 8 UF, equivalent to 0.5% of the market value of a similar equipment. Equipment performance tests were not performed due to lack of essential equipment for its purpose. The study demonstrated that the design and construction of low-cost laboratory-scale equipment is feasible.

- AGRADECIMIENTOS Y/O DEDICATORIA.

Agradezco a mi familia, tanto a mi madre como a mi hermano quienes me han ayudado a seguir adelante en mis sueños y objetivos, como también me han dado las mejores enseñanzas que uno podría recibir. De mi hermano rescato el que los objetivos o sueños, por muy distantes y difíciles que se vean siempre pueden lograrse, solo depende de la motivación y convicción de uno mismo. De mi madre el apoyo incondicional que me ha entregado durante toda mi vida, para todos mis proyectos siempre he recibido apoyo y enseñanzas de su parte. No sería la persona que soy hoy si no fuera por ella y por su esfuerzo sobre humano de poder sacar adelante a la familia, algo de lo que le estaré siempre agradecido y en deuda.

Mis amigos han sido un pilar importante en mi crecimiento como persona y durante esta investigación con su ayuda y motivación y no puedo dejarlos fuera de este agradecimiento.

Por último, pero no menos importante, agradezco a todos los profesores que he tenido durante esta aventura universitaria, ya que cada uno me ha enseñado de una manera diferente la emoción por el conocimiento y el avance en la vida. Son los profesores los pilares del desarrollo y son quienes han decidido dedicar sus vidas para así lograr que las futuras generaciones podamos gozar de mayor conocimiento y progreso y por eso es que se les debe agradecer todos los días. No mucha gente está dispuesta a dedicar su vida al resto como lo hace un profesor y espero poder absorber aunque sea un poco de su motivación y ganas de entregar algo positivo a la sociedad para así yo también poder hacerlo en un futuro. Parafraseando a Einstein, “Es el verdadero arte del maestro despertar la alegría por el trabajo y el conocimiento”, siendo eso algo que siento logro despertar en mí estos años académicos en la universidad. Es por eso que les agradezco a todos los profesores que he tenido durante esta carrera, muchas gracias. Aunque el premio se aprecie a veces pequeño y mezquino, no desvíen su honorable camino de la enseñanza, por favor.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
Resumen.....	i
Agradecimientos.....	iii
Listado de figuras.....	vii
Listado de tablas.....	viii
1. Introducción.....	1
2. Planteamiento del problema.....	3
3. Revisión bibliográfica.....	4
3.1. Etapas de la digestión anaeróbica.....	4
3.2. Productos derivados de una reacción anaeróbica.....	6
3.3. Biorreactores para digestión anaeróbica.....	7
3.3.1. Tipos de biorreactores.....	7
3.3.2. Modos de operación de biorreactores.....	8
3.3.3. Estructura de un biodigestor.....	9
3.3.4. Diseño de biodigestor.....	10
3.3.5. Sistemas de medición y control manipulables y de respuesta.....	13
3.4. Estudios previos en relación a biorreactores confeccionados.....	16
3.5. Métodos de prueba de digestores.....	18
Objetivos.....	19
5. Metodología.....	20
5.1. Objetivo 1: Diseño de biorreactor.....	20
5.1.1. Diseño geométrico de biorreactor.....	20
5.1.2 Volumen de digestor.....	22
5.1.3 Diseño de agitador.....	23
5.1.4 Diseño medio de calefacción.....	23
5.2. Objetivo 2: Construcción de biorreactor.....	23

5.2.1. Selección de material de tanque.....	23
5.2.2. Materiales de biodigestor.....	23
5.2.3. Selección de agitador.....	24
5.2.4. Modo de calefacción.....	24
5.3. Objetivo 3. Pruebas de funcionamiento.....	24
5.3.1. Prueba hidrostática.....	24
5.3.2. Prueba de elasticidad.....	25
5.3.3. Prueba de temperatura.....	25
5.3.4. Prueba de agitación.....	26
6. Resultados y discusiones.....	27
6.1. Diseño de biodigestor.....	27
6.1.1. Diseño geométrico del biorreactor.....	27
6.1.2. Presión interna de trabajo y espesor mínimo.....	27
6.1.3. Diseño de tapas.....	28
6.1.4. Diseño de agitador.....	28
6.1.5. Diseño de sistema de calefacción.....	29
6.2. Construcción de biodigestor.....	30
6.2.1. Selección de material.....	30
6.2.2. Sistema de agitación.....	35
6.2.3. Sistema de calefacción.....	36
6.2.4. Costo de materiales.....	39
6.3. Pruebas de funcionamiento.....	39
6.3.1. Prueba hidrostática.....	40
6.3.2. Prueba de elasticidad.....	40
6.3.3. Prueba de temperatura.....	41
6.3.4. Prueba de agitación.....	41
7. Conclusión.....	42

8. Referencias.....	44
Anexos.....	48
Anexo A. Composición biogás.....	48
Anexo B. Variables de diseño tapas y agitador.....	48
Anexo C. Selección material tanque y tipo de soldadura.....	55
Anexo D. Materiales para construcción de tanque.....	59
Anexo E Boletas materiales de compra.....	63
Anexo F. Cotización biorreactor escala laboratorio.....	65
Anexo H. Ecuación de Fourier y cálculo de calor perdido en serpentín.....	66

LISTADO DE FIGURAS.

Figura 1. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica.	5
Figura 2. Obtención de metano a partir de digestión anaerobia.	6
Figura 3. Biorreactor de torre.....	7
Figura 4. Biorreactor Airlift.....	8
Figura 5. Biorreactor con agitación mecánica.....	8
Figura 6. Estructura típica de un digestor.....	10
Figura 7. Tubo y plancha de acero inoxidable.....	32
Figura 8. Proceso de soldadura.....	32
Figura 9. Fondo de acero inoxidable soldado a tanque digestor.....	33
Figura 10. Tapa superior con pernos y tuercas tipo mariposa.....	33
Figura 11. Tapa superior con válvulas y sensor de temperatura incorporado.....	34
Figura 12. O-Ring de sello tapa superior adherido con silicona roja.....	34
Figura 13. Agitador tipo helicoidal de acero inoxidable.....	36
Figura 14. Tanque digestor con serpentín externo de calefacción instalado.....	36
Figura 15. Pared externa de tanque digestor con aislante recubierto.....	37
Figura 16. Tanque digestor finalizado.....	38
Figura 17. Tapa superior tanque digestor.....	38

LISTADO DE TABLAS.

Tabla 1. Rangos óptimos de pH para las diferentes etapas de la digestión anaerobia.....	5
Tabla 2. Resumen de factores.....	12
Tabla 3. Estudios previos de biorreactores elaborados.....	17
Tabla 4. Dimensiones obtenidas para tanque digestor.....	27
Tabla 5. Presión hidrostática y presión interna de trabajo.....	27
Tabla 6. Espesor mínimo para cilindro y tapa de acero inoxidable.....	28
Tabla 7. Dimensiones geométricas de agitador tipo helicoidal.....	28
Tabla 8. Opciones para sistema de calefacción.....	29
Tabla 9. Materiales de conexión.....	31
Tabla 10. Dimensiones reales tanque digestor.....	35
Tabla 11. Dimensiones geométricas reales agitador tipo helicoidal.....	35
Tabla 12. Costo de materiales y servicios para construcción.....	39

1. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos sólidos municipales ha crecido dramáticamente los últimos años debido al aumento poblacional a nivel mundial, en este sentido se estima que la población mundial superará los 9 mil millones de personas para el año 2050 (Michalopoulos et al., 2018).

De acuerdo a lo anterior, cerca de 1,3 billones de toneladas de residuos sólidos urbanos son generados anualmente a nivel mundial, los cuales se espera, aumentarán hasta superar los 2,2 billones de toneladas la próxima década. El porcentaje de residuos sólidos orgánicos varían entre 30-70%, dependiendo de grado de desarrollo de cada país, esto debido a que países menos desarrollados, tienden a aumentar el consumo de material orgánico como alimento, el que en un alto porcentaje termina como residuo (San Millan, 2018).

Un 95% de los residuos orgánicos terminan en rellenos sanitarios, donde se desaprovechan los nutrientes y la utilización de estos como un posible recuperador energético. Además, los residuos orgánicos son responsables de la producción de gas metano durante su fermentación en rellenos sanitarios, el cual, al no ser tratado de manera correcta, contribuye al efecto invernadero (Michalopoulos et al., 2018). En virtud de lo anterior, la recuperación y aprovechamiento de metano a partir de residuos orgánicos es una actividad prioritaria de los mecanismos de desarrollo limpio enunciados en la convención del cambio climático de la organización de las naciones unidas (ONU), la que busca fomentar la reducción de emanación de estos gases (Menna et al., 2007).

Una alternativa de valorización de residuos orgánicos es la implementación de un proceso de digestión anaeróbica con la finalidad de generar productos de interés como el biogás y el bioabono, lo cual permite contribuir a la filosofía de la economía circular y lograr mecanismos para restauración y recuperación de materiales (Scheel y Aguiñaga, 2017).

La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo, en el cual la utilización de sustratos orgánicos (residuos animales y vegetales) son capaces de convertirse en biogás, por la participación de bacterias anaerobias.

El biogás es una mezcla gaseosa compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), aunque también contiene impurezas en bajas proporciones como lo son el monóxido de carbono, gases sulfhídricos, mercaptanos e hidrogeno, los cuales son considerados peligrosos y requieren que el biogás obtenido sea purificado antes de su uso (FAO, 2011).

El biogás que generalmente se produce, es un gas incoloro, inflamable con un poder calorífico de 4400 kcal/m^3 , casi la mitad del poder calorífico del gas natural, que tiene un valor de 8900 kcal/m^3 (Olaya y Gonzalez, 2009; Gonzalez et al., 1994).

En relación al bioabono, las características y calidad del mismo son dependientes en gran medida de la materia prima ocupada en el proceso de digestión como de la tecnología

utilizada. Durante el proceso de digestión anaeróbica, la composición de la materia sólida (lodo) remanente, al final del proceso, tiene una menor composición de materia orgánica, con un contenido de nitrógeno amoniacal mayor y un bajo contenido de nitrógeno orgánico, produciendo un fertilizante con buenas propiedades para su uso (FAO, 2011).

Para poder dirigir la tecnología de la bioenergía a un avance y mejora a nivel nacional y mundial, apoyado de la filosofía de economía circular y generar una ayuda a la disminución de contaminación mundial, es necesario realizar investigaciones profundas en el tema. En Chile el año 2018, apenas un 0,8% de la producción bruta de la matriz energética primaria y un 0,34% de la matriz energética total corresponde a biogás (Energía abierta, 2018), lo que puede explicarse por su baja efectividad y tiempo de producción. Lo anterior evidencia una clara necesidad de investigación e implementación de mejoras en el proceso, tanto para aumentar la efectividad de este como el costo de implementación de esta tecnología. Otro motivo para fomentar la investigación y avances en el área de producción energética a partir de uso de residuos es debido a la implementación de la ley de responsabilidad extendida al productor, buscando reutilizar residuos para generar productos con valor agregado (biogás y bioabono) (Ministerio del medio ambiente, 2016).

El siguiente trabajo busca demostrar que es factible la implementación de un equipo de laboratorio, de bajo costo, adaptado a la tecnología de la digestión anaerobia con el fin de realizar investigaciones en el área. Con esto se busca lograr avances en el desarrollo de esta tecnología para así aumentar el desarrollo energético limpio a nivel local. La ventaja que presenta que el equipo sea de bajo costo es la facilidad de adquisición para realizar investigaciones con él, tanto en centros de investigación como universidades que no cuenten con los recursos necesarios para adquirir un equipo de grado comercial.

En el capítulo 2, se abordará el problema en cuestión y los motivos para realizar la investigación, explicando las limitaciones de la misma. En cuanto al capítulo 3, se buscará dar una explicación detallada del proceso y del diseño del equipo digestor a construir. El capítulo 4 detallará los objetivos, tanto generales como específicos, a ser tratados a lo largo de la investigación. Luego, en el capítulo 5 se planteará el procedimiento metodológico, con los pasos que se seguirán, a fin de responder los objetivos de la investigación. El capítulo 6 dará a conocer los resultados junto a las respectivas discusiones de estos para finalizar con el capítulo 7, el cual explicará las conclusiones y recomendaciones correspondientes al proyecto.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Si bien el proceso de digestión anaeróbica es un tema ampliamente conocido, se deben realizar avances en esta área para que este proceso pueda competir directamente con métodos convencionales para la generación de energía como lo son el carbón y petróleo. Los avances en el área están determinados por las investigaciones que se pueden realizar a nivel de laboratorio para tener un mayor conocimiento y comprensión de los factores que influyen directamente en la producción de biogás, como puede ser una mejor caracterización de la materia prima a utilizar en cada proceso, las condiciones de operación y técnicas de optimización. En cuanto a los estudios, existe un universo de estudiantes universitarios, especialmente de ingeniería civil química que cuentan con las capacidades para hacer frente a estas investigaciones y búsquedas de avances y mejoras en el área, logrando ampliarla a escala industrial. El problema recae en que no se cuenta con las herramientas necesarias para profundizar en el tema debido a los altos costos de estas. Con el fin de conocer en profundidad el proceso de digestión anaeróbico en un sustrato como lo son los residuos sólidos y líquidos, se requiere de equipos de laboratorio como biorreactores y sensores, entre otros, cuyos precios fluctúan entre los 20 a 40 millones CLP (Ver anexo F). Precios de esta magnitud se consideran fuera del alcance de una gran cantidad de centros de investigación y universidades locales.

En la universidad del Bío Bío existen actualmente 2 biorreactores de escala laboratorio, los cuales tienen un uso restringido al cultivo de microorganismos puros con fines bastante delicados y difícilmente pueden usarse para el tratamiento de residuos sin tener riesgo de contaminaciones futuras. Es por ello, que se hace interesante contar con equipos funcionales de menor costo, que permitan una operación segura y sea funcional, que no supere el orden de las 5,5 UF, accesibles a cualquier centro de investigación local. Con lo que se podrá contar con una mayor cantidad de equipos disponibles para realizar investigaciones en el área y así poder hacer un aporte frente a problemas medioambientales como lo son la emanación de gases de efecto invernadero (GEI) por la producción energética a partir de combustibles fósiles.

En resumen, si bien centros de investigación en universidades cuentan con el personal necesario (estudiantes), espacios para desarrollar las investigaciones (laboratorios), docentes calificados para dar un apoyo y ayuda necesarios en el tema. Lo que hace falta son las herramientas físicas (equipos), las cuales ayudarán tanto a docentes, en la búsqueda de mejorar el conocimiento de sus estudiantes en el área de tratamiento de residuos y reutilización de los mismos, como también a estudiantes promoviendo que la experiencia universitaria logre un avance desde solo conocimiento teórico de procesos a un conocimiento práctico de estos, como también para incentivar en la investigación y mejoras en las habilidades de los alumnos requeridas por la industria, entre las cuales destaca enfrentarse a desafíos y dar solución a problemas. El avance a un conocimiento práctico por parte de los estudiantes, ayudará a que puedan visualizar de forma realista la función de los mismos en el campo profesional.

El trabajo realizado se considera una primera etapa de este proceso. La puesta en marcha y uso del equipo constituyen las siguientes etapas del proceso.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Un manejo adecuado de los residuos orgánicos se obtiene mediante diferentes tratamientos, los cuales implican un proceso de reciclaje de esta materia orgánica, para convertirlas en productos con valor agregado. El reciclaje de materia orgánica ha recibido un alto impulso a nivel mundial, lo que ha generado la investigación de nuevas técnicas para la generación limpia de energía, producción de fertilizantes químicos de alta gama, entre otros. El proceso de digestión anaeróbica ha mostrado tener una amplia utilización en la generación de biogás y/o de bioabono (FAO, 2011). El proceso de digestión anaeróbica es bien utilizado en la búsqueda de tratamiento de RILEs, con el cual, además de generar los productos con valor agregado mencionados anteriormente, ayudan a limpiar aguas residuales disminuyendo tanto su carga orgánica como los ácidos volátiles (Ramalho, 1996). Actualmente, en Chile se encuentran activas 6 plantas de tratamiento de RILEs que cuentan con proceso de digestión anaerobia con el fin de generar biogás. El año 2018 alcanzaron una generación de 68,2 millones de metros cúbicos de biogás (SISS, 2019).

La digestión anaeróbica es un proceso complejo, por una parte, por el número de reacciones bioquímicas que están involucradas y, por otra, por la cantidad de microorganismos implicados en estas. En el proceso, muchas de las reacciones ocurren de forma simultánea.

De acuerdo a lo anterior, estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta la actualidad, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas (FAO, 2011), los cuales serán revisados en la sección 3.1.

3.1 Etapas de la digestión anaeróbica.

(a) Hidrolisis: En esta primera etapa, las proteínas, carbohidratos y grasas se transforman en compuestos solubles por acción de bacterias proteolíticas, celulíticas y lipolíticas, respectivamente. Esta etapa se considera fundamental para suministrar los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización anaeróbica para que sean utilizados por las bacterias responsables de las etapas siguientes (Toala, 2013).

(b) Etapa fermentativa o acidogénica: Los compuestos resultantes de la etapa hidrolítica, son transformados por acción de bacterias en ácidos orgánicos simples volátiles, acetatos, amoniacos, hidrogeno y dióxido de carbono. Esta etapa se puede llevar a cabo por bacterias anaeróbicas o facultativas (Toala, 2013).

(c) Etapa acetogénica: Las bacterias acetogénicas, junto a las *Archaeas* metanogénicas, transforman los ácidos grasos resultantes en los sustratos propios de la metanogénesis (Toala, 2013).

(d) Etapa metanogénica: Finalmente, a través de la acción de las bacterias metanogénicas, el hidrogeno y parte de los acetatos son transformados en metano y dióxido de carbono. En esta etapa se distinguen dos tipos de bacterias, las metanogénicas acetoclásticas, las cuales

transforman el acetato en metano, y las metanogénicas hidrogenófilas que convierten el hidrogeno y el dióxido de carbono en metano (Toala, 2013; Lorente et al., 2018).

La figura 1 muestra un esquema representativo de las etapas de digestión anaeróbica recién nombradas.

Cada una de estas etapas está restringidas a parámetros ambientales, como pH y temperatura. La temperatura determina la velocidad de degradación del proceso anaeróbico, sobre todo de las etapas de hidrolisis y metanogénesis, las que se consideran como etapas limitantes del proceso. Con el aumento de rango de temperatura aumenta la velocidad de la etapa de hidrolisis, la velocidad de crecimiento y con ello, la producción de biogás. (Lorente, et al., 2018). En cuanto al pH, en cada etapa, los microorganismos muestran una actividad máxima en rangos de pH diferentes, los cuales se observan en la tabla 1 (Lorente, y otros, 2018).

Tabla 1. Rangos óptimos de pH para las diferentes etapas de la digestión anaerobia.

Etapa	Tipo de bacteria	Rango óptimo de pH
Hidrolisis	Hidrolíticas acidogénicas	7,2 – 7,4
Acidogénesis	Hidrolíticas acidogénicas	7,2 – 7,4
Acetogénesis	Acetogénicas y homoacetogénicas	7,0 – 7,2
Metanogénesis	Metanogénesis y acetogénesis	6,5 – 7,5

Fuente (Lorente et al., 2018).

Se ha demostrado que un 70% del metano producido en biorreactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético. Solo dos géneros pueden utilizar acetato como aceptor de electrones. Estas especies acetotróficas son *Methanosarcina* y *Methanothrix*. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol (FAO, 2011).

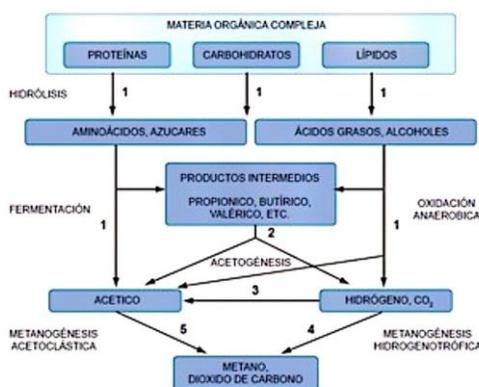


Figura 1. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica. Fuente (FAO, 2011).

3.2. Productos derivados de una reacción anaeróbica.

Biogás: Se puede definir como una mezcla de gases combustibles con una composición que varía dependiendo del tipo de material orgánico utilizado para su producción (véase tabla 1 anexo A). El biogás, al tener una composición gaseosa, puede ser utilizado tanto para fines domésticos como industriales. Dispositivos como estufas, lámparas, calentadores radiantes pueden utilizar biogás como medio de generación de calor y como combustible para motores diésel o a gasolina (Olaya y Gonzalez, 2009). Además de generar calor y combustible, el biogás se puede utilizar con el fin de generar electricidad mediante el uso de motores de combustión interna o turbinas de gas. Con la finalidad de poder utilizar el biogás como productor de electricidad, este requiere la remoción de H_2S (bajo 100 ppm) y vapor de agua, ya que la combinación de ambos compuestos generan ácido sulfúrico (H_2SO_4), el cual es bastante corrosivo para motores y sus componentes. (FAO, 2011).

Bioabono: El efluente tratado al finalizar el proceso de biodigestión anaeróbica es un gran fertilizante orgánico, esto debido a que la mayoría de sus nutrientes principales como nitrógeno, fósforo y potasio se conservan en él. Su composición, generalmente, considera un 8,5% de materia orgánica, 2,6% de fósforo y 1% de potasio, con un pH de 7,5. El correcto uso de nutrientes reciclados genera una mejor calidad en el suelo y en las siembras representando un beneficio para el agricultor (Olaya y Gonzalez, 2009).

La generación, tanto de biogás como de bioabono, además de significar la creación de nuevos productos con valor agregado, incurre en una reducción de la materia orgánica presente en el afluente, la cual en caso de no ser tratada generaría efectos contaminantes en la atmósfera. El tratamiento de residuos líquidos, por medio del proceso de digestión anaeróbica, por lo tanto, además de generar productos, cumple con su función de tratar estos residuos para producir una limpieza de los afluentes líquidos (Ramalho, 1996). La figura 2 muestra el proceso de degradación anaerobia en un residuo líquido orgánico, mostrando como el proceso de digestión anaerobia, además de producir biogás (CH_4), disminuye la concentración de ácidos volátiles y la concentración de materia orgánica presente en el residuo líquido, la cual se puede observar por el comportamiento de la curva de DQO remanente, la cual, según Ramalho, (1996), corresponde al volumen de oxígeno requerido para oxidar la fracción orgánica presente en la muestra.

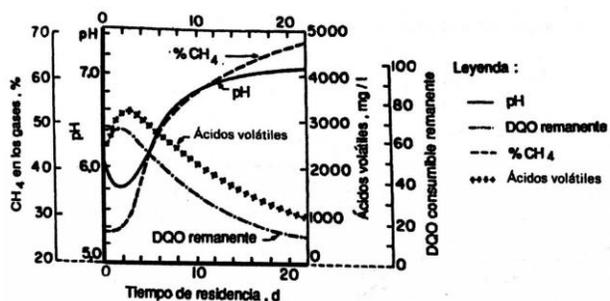


Figura 2. Obtención de metano a partir de digestión anaerobia. Fuente (Ramalho, 1996).

Para llevar a cabo procesos de digestión o fermentación anaeróbica, se necesita de un recipiente con las condiciones adecuadas para su funcionamiento, con la capacidad de mantener y modificar en caso necesario las condiciones ambientales adecuadas que favorecen el proceso. Estos equipos se denominan biorreactores.

De acuerdo a Flores, (2014), un biorreactor se puede definir como un dispositivo que proporciona las características de pH, temperatura, oxígeno y sales que necesita un medio de cultivo para obtener, mediante procesos de reacciones bioquímicas, un producto deseado.

3.3. Biorreactores para digestión anaerobia.

Los biorreactores pueden ser construidos en materiales como vidrio y acero inoxidable, debido a que, estos materiales proporcionan un mejor ambiente aséptico y son resistentes a la corrosión, lo que incrementa su productividad y vida útil (Flores, 2014).

Estos se utilizan en la producción de ácidos orgánicos, vitaminas, fermentación alcohólica, tratamiento de aguas residuales, antibióticos, metabolitos secundarios, entre otros (Huaman y Leon, 2019).

3.3.1 Tipos de biorreactores.

Los biorreactores son clasificados según su configuración y diseño, entre ellos se pueden encontrar tres.

(a) Biorreactor de torre.

Se caracteriza porque la relación entre el diámetro y la altura del tanque es grande, es decir que este tipo de fermentadores tienen una altura significativa en relación al diámetro del mismo (normalmente, una relación 10:1). Se utilizan comúnmente en cultivos continuos y heterogéneos (Flores, 2014).

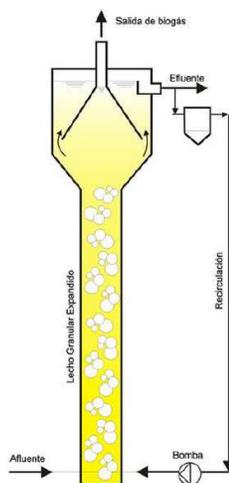


Figura 3. Biorreactor de torre. Fuente (Ocaña Pérez-Cerdá, 2011).

(b) Biorreactor air-lift.

Este tipo de biorreactores consiste en un sistema de agitación neumática constituido por una columna dentro del contenedor, que facilita el intercambio de materia gas-liquido por medio de la entrada inferior de CO₂ a través de una cavidad. Su uso se ha popularizado en el tratamiento de aguas, la industria química y bioprocesos (Moreno y Vanegas, 2017).

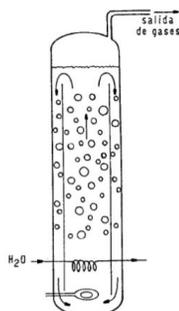


Figura 4. Biorreactor Airlift. Fuente (Ortiz, 2011).

(c) Biorreactor con agitación mecánica.

Son los más utilizados debido a su fácil funcionamiento y confiabilidad; constan de un soporte de acero inoxidable, fijado en la tapa o en la base del reactor, que tiene un sistema de agitación del tipo necesario según el producto que se desee obtener (Flores, 2014).

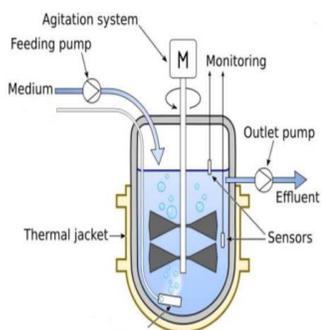


Figura 5. Biorreactor con agitación mecánica. Fuente (Ortiz, 2011).

3.3.2. Modos de operación de biorreactores.

Los digestores anaerobios pueden clasificarse de diferentes maneras, de acuerdo a su funcionalidad, al tipo de construcción o al tipo de operación que realizara (Torres, 2019).

El modo de operación de un digestor anaerobio depende, en gran medida de la disponibilidad de materia prima como también de la finalidad del proceso, el cual puede ser productivo o investigativo (Torres, 2019; Lorente et al., 2018).

El modo de operación de un digestor anaerobio se divide en tres tipos:

(a) Operación continua.

Un biodigestor de flujo continuo es aquel que tiene un afluente y un efluente continuos. En el reactor de flujo continuo se tiene un intercambio de masa a lo largo del tiempo de operación. Donde se busca llegar al estado estacionario mediante el control de las condiciones de operación que son de flujo de sustrato, pH y temperatura (Lorente et al., 2018).

(b) Operación semi continua.

En el caso de reactores semi continuos, el sustrato se adiciona en intervalo de tiempos conocidos ya sea de forma automática o de forma manual y el producto es retirado únicamente al final del proceso, por lo que el volumen inicial no será igual al volumen final. Esto puede acarrear problemas si no se lleva un control adecuado o si los nutrientes son ingresados en cantidades o tiempos erróneos. (Flores, 2014)

(c) Operación discontinua (Batch o por lote).

La carga de la totalidad del material a fermentar se hace al inicio del proceso y la descarga del efluente se hace al finalizar el proceso; por lo general requieren de mayor mano de obra y de un espacio para almacenar la materia prima si esta se produce continuamente y de un depósito de gas (debido a la gran variación en la cantidad de gas producido durante el proceso, teniendo su pico en la fase media de este) o fuentes alternativas para suplirlo (Lorente et al., 2018). Este modo de operación es perfecto para una aplicación a nivel de laboratorio, donde su principal objetivo sea valorar los parámetros del proceso o el estudio de algún residuo en particular (Torres, 2019)

3.3.3. Estructura de un biodigestor.

Tal como muestran las figuras 3, 4 y 5, existen muchas variaciones en el diseño de un biodigestor (Lorente et al., 2018). Algunos elementos que comúnmente se incorporan son:

(a) Cámara de fermentación: Es el espacio donde se lleva a cabo el crecimiento del microorganismo. Se efectúa el consumo de sustrato y la producción de metabolitos.

(b) Cámara de almacén de gas: Es el espacio donde se acumula el biogás antes de ser extraído.

(c) Pila de carga: Es el punto donde ingresa la biomasa.

(d) Pila de descarga: La salida de lodos, sirve para retirar los residuos que están gastados y ya no son útiles para el biogás, pero que se pueden utilizar como abono.

(e) Agitador: Desplaza los residuos que están en el fondo por todo el digestor, para generar una homogeneización en las condiciones de sustrato, temperatura y pH en el sistema.

(f) Tubería de gas: Punto de salida del biogás.

La figura 6 muestra una representación de los elementos comunes en un biodigestor.

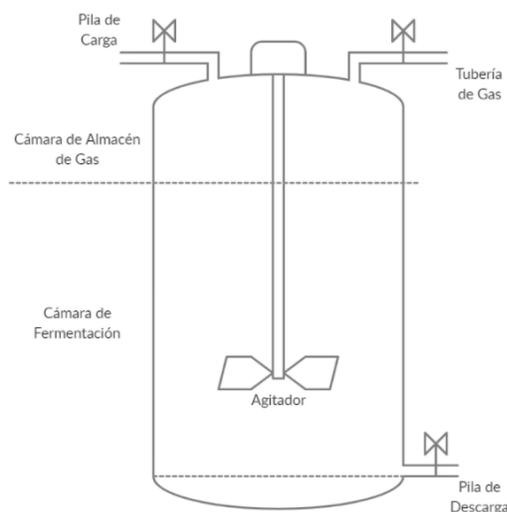


Figura 6. Estructura típica de un digestor. Adaptado de Ortiz, (2011).

3.3.4. Diseño de biodigestor.

El diseño de biodigestores debe dar respuesta tanto al lugar donde se piensa su instalación, como el grado de aplicación y la finalidad de la tecnología aplicada. El material de carga que se dispone también es relevante a la hora de hacer una selección adecuada de un biodigestor (Toala, 2013).

Los digestores pueden diseñarse de diferentes formas. Una es la forma cilíndrica, en la cual el diseño del equipo se realiza de forma vertical u horizontal, mientras la otra opción son los tanques de geometría esférica, los cuales son utilizados de manera más común para almacenaje de fluidos a altas presiones (León, 2001).

Debido a que el proceso de digestión anaerobia produce un aumento en la presión interna del sistema, para los digestores cilíndricos se debe tener consideración en el diseño de las tapas del equipo, cuya función es la de “cerrar” el recipiente, evitando así la fuga de fluidos, ingreso de contaminantes desde el exterior, entre otras cosas (León, 2001). Los diferentes tipos de tapas utilizadas para digestores, junto con una explicación del uso de cada una se explican en la tabla 1 del anexo B.

Al momento de diseñar un biodigestor, se deben considerar diversos factores operacionales, como el tiempo de retención hidráulico (t_{rh}), el cual se define como el tiempo que necesitan los microorganismos para consumir la materia prima (FAO, 2011). Además del tiempo de retención hidráulico, factores como el tipo de mezclado, las unidades o etapas y la

temperatura, junto a las propiedades de la materia prima forman la base primordial para un diseño correcto (Pacheco, 2016).

Para asegurar que el mezclado del proceso sea correcto, es importante realizar un buen diseño del agitador. El objetivo del diseño de un agitador es definir las proporciones del mismo, como la altura, diámetro, distancia a la pared, entre otros (Cabrera y Durazno, 2016). La agitación tiene la finalidad de homogenizar las condiciones dentro de la cámara de fermentación (Castillo, 2013). Existen diferentes tipos de agitadores, los cuales se muestran con sus correlaciones geométricas respectivas en la tabla 4 del anexo B.

Se debe tomar en consideración el aspecto dimensional que divide al biodigestor en dos zonas. Una es la zona gaseosa, espacio donde se acumula el biogás generado durante el proceso de biodigestión y una segunda zona correspondiente al espacio ocupado por la biomasa o sustrato a utilizar (Toala, 2013). La zona gaseosa ocupa un 25% del volumen total del biodigestor, mientras que la zona líquida completa el 75% restante (Toala, 2013). La relación anterior es importante con el fin de tener un mejor concepto del volumen total del tanque biodigestor.

La tabla 2 muestra un resumen de los factores relevantes en el diseño de un digestor anaerobio como también en su correcto funcionamiento.

Tabla 2. Resumen de factores relevantes en digestión anaeróbica.

Factores	Rangos	Observación
Temperatura	Mesofílico: 25-45 °C Termofílico: 45-65 °C	Si bien la velocidad de producción de biogás es mayor en rango termofílico, el rango mesofílico es más estable.
pH	Acidogénicos: 5,5-6,5 Metanogénicos: 7,8-8,2 Cultivo mixto: 6,8-7,4	En una digestión anaerobia, los cambios de pH deben ser sensibles. Un pH inferior a 6,0 produce que el biogás generado sea pobre en metano, teniendo menos cualidades energéticas. Valores de pH superiores a 8,0 contribuyen en la disminución de actividad metanogénica.
Relación C/N	Optimo: 16/1 Rango aceptable: 20/1 – 30/1	En situaciones donde la relación carbono/nitrógeno es mayor al optimo, se genera un mayor tiempo de espera para la producción de biogás. En cambio. Una relación C/N menor a 8/1, produce una inhibición de la actividad bacteriana, esto debido a la excesiva formación de amonio, el cual en grandes cantidades es toxico e inhibe el proceso.
Tiempo de residencia hidráulico (TRH)	Reacción psicofílica: más de 100 días. Reacción mesofílica: 15 – 20 días (Puede variar con el tipo de reactor) Reacción termofílica: 8 – 20 días.	Para el caso de un digestor que opera a régimen discontinuo, el tiempo de retención es el que transcurre entre la carga del sistema y su descarga. Para el caso de un digestor semi continuo, el tiempo de

		retención va a determinar el volumen diario de carga en relación al volumen total del digestor.
Amoniaco	Menor a 2000 mg/L	Este parámetro es importante cuando se utilizan materiales con un alto contenido de amoniaco, como las heces de ave.

Fuente (FAO, 2011; Olaya y González, 2009).

Otro factor interesante de mencionar es la agitación; Los objetivos que busca cumplir la agitación son: Remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar formación de costra, uniformar la densidad bacteriana para evitar la formación de puntos muertos que reduzcan el volumen efectivo del digestor y prevenir formación de espuma y sedimentación (FAO, 2011).

Al seleccionar un sistema de agitación, frecuencia e intensidad de agitación, se debe considerar que un proceso anaeróbico involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias. La ruptura de este equilibrio implicara una merma en la actividad biológica y por ende una reducción en la producción del biogás (FAO, 2011).

3.3.5. Sistemas de medición y control manipulables y de respuesta.

Junto con los parámetros de diseño, es importante complementar el biorreactor con el instrumental adecuado.

Los sistemas de medición tienen la función de asignar, de forma objetiva y empírica, un valor numérico a una propiedad o cualidad de un objeto con el fin de describirlo. Esto quiere decir que el resultado de la medida debe ser independiente del observador, basada en experimentación y de la forma que genere una correspondencia entre las relaciones numéricas y las relaciones entre las propiedades descritas (Pallás, 2003).

Existen varios factores influyentes en el proceso de digestión, los cuales se deben medir y controlar para así evitar la inhibición de la fermentación anaerobia (Galarza, 2020). Con el fin de llevar a cabo las mediciones y eventuales controles de diferentes factores, se requiere de la utilización de sensores. Los sensores se consideran dispositivos electrónicos que permiten la interacción con el entorno, proporcionando información de ciertas variables con el fin de procesarlas para generar ordenes o activar procesos (Pallás, 2003).

Las siguientes variables son necesarias de medir y, en algunos casos, controlar para poder asegurar un funcionamiento correcto del proceso.

pH:

Como se nombró anteriormente, este factor tiene una influencia directa en el proceso de biodigestión y sobre todo en la producción de biogás. Un eventual descontrol de pH afecta directamente en la estabilidad de todo el proceso ya que valores fuera de rango (6,8 – 7,4) puede bajar la calidad de biogás generada como también producir compuestos tóxicos para el proceso debido a inhibición de la actividad metanogénica (Pulido, 2016).

El valor de pH en una muestra se puede medir con diferentes métodos. El más común es el uso de un electrodo de vidrio sensible al pH, un electrodo de referencia y un medidor. Otros métodos son los indicadores y los colorímetros (Hernandez et al., 2015).

Temperatura:

La temperatura es uno de los factores más relevantes durante el proceso de digestión anaeróbica, ya que determina la velocidad de degradación de la materia prima durante el proceso anaeróbico (Lorente et al., 2018). Existen tres rangos de temperatura para trabajar (psicrofílico, mesofílico y termofílico), donde cada uno tiene sus puntos óptimos y rangos extremos, a los que, al superarlos, genera problemas en el proceso de digestión, causando la inhibición de microorganismos anaerobios, lo que provoca una menor producción de biogás (Macías, 2016). Es por ello que la temperatura interna del digestor debe ser monitoreada constantemente a lo largo del proceso. Para el fin de medir y monitorear la temperatura del proceso, se utilizan sensores de temperatura. Existen varios tipos de sensores, como los termopar, grupo al que forman parte las termocuplas, sensor tipo J, hierro-constantán, entre otros. Otro tipo de sensor son el circuito integrado LM35 y los termistores NTC y PTC (Alzate et al., 2007).

Producción de biogás:

La producción y composición de gases generados durante el proceso de digestión anaeróbica tiene una relación directa con el grado de estabilización de los compuestos orgánicos (Menéndez y Pérez, 2007). La cantidad de gas producido es variable ya que depende en gran medida de la composición de la biomasa utilizada. Hoy en día se ha logrado caracterizar las diferentes fuentes de biomasa (estiércol carpinos y ovinos, estiércol equino, estiércol avícola o residuos líquidos domésticos), dando una aproximación del volumen de biogás generado por kilogramo de biomasa (Olaya y González, 2009). Por otra parte, la composición de los gases producidos varía. Un digestor anaerobio que funcione a condiciones óptimas puede tener una producción de biogás constituido por un 75 a 85% de metano, y el resto prácticamente dióxido de carbono. En caso de que el digestor opere en condiciones desfavorables se puede mantener la producción de biogás constante por un tiempo mientras que la composición relativa varía (Menéndez y Pérez, 2007).

Con la finalidad de medir la cantidad de gas producida se puede utilizar un equipo llamado gasómetro, el cual puede funcionar bajo el principio de desplazamiento de agua o bajo el principio de “campana flotante” (Menna et al., 2007).

Para conocer la composición del biogás, es necesario contar con sensores de gases, específicamente con un sensor de metano, al ser este compuesto el relevante para el proceso. Un sensor útil para la medición de metano gas es el sensor MQ4 (SKU: SEN 0161), el cual entrega un valor respectivo a la cantidad de metano presente en el espacio a medir (Macías, 2016).

Tipo de agitación:

La agitación aumenta la producción de biogás y a la vez disminuye el tiempo de residencia, esto se debe básicamente a cuatro razones (FAO, 2011):

- (a) Distribución uniforme de temperatura y substrato al interior del digestor.
- (b) Distribución uniforme de los productos, tanto intermedios como finales.
- (c) Mayor contacto entre el substrato y las bacterias, evitando la formación de cúmulos alrededor de las bacterias.
- (d) Evitar la acumulación de lodo en la parte superior del digestor, que dificulta la salida del biogás.

Se distinguen 3 tipos de agitación, Estas son:

- (a) Mecánica: A través de agitadores manuales o con motores eléctricos.
- (b) Hidráulica: A través de bombas de flujo lento se hace recircular la biomasa.
- (c) Burbujeo de biogás: Se recircula el biogás producido al fondo del digestor por medio de cañerías, para producir burbujeo y de esta manera movimiento de la biomasa.

Edad de lodo:

Si bien la producción de biomasa durante una digestión anaerobia es menor a la producida de una digestión aerobia, este factor debe ser considerado, debido a que garantizara, en cierta medida que el reactor no se lave en un momento que genere la inhibición del proceso (Menéndez y Pérez, 2007).

La edad del lodo tiene una aplicación directa en el diseño y control de reactores completamente mezclados, pero en reactores donde la biomasa no es homogénea no tiene un uso práctico. La edad del lodo, junto con la temperatura, son los factores de los cuales depende la obtención del tiempo de residencia hidráulico, ya que si bien la temperatura da un estimado de tiempo de retención, la edad del lodo entrega datos directos sobre el momento de digestión que se está presentando (Menéndez y Pérez, 2007). Cuando la edad del lodo se encuentra por debajo de 10 días, la producción de metano disminuye y para valores por debajo de los 3 o 4 días, este se ve completamente detenido (Yanirias y Lixis, 2010).

Demanda química de oxígeno (DQO):

La DQO mide la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida. Este método es utilizado para medir el grado de contaminación en los efluentes líquidos, expresándose en miligramos de oxígeno diatómico por litro de efluente. [mg O₂/L]. Si bien este método busca medir la concentración de materia orgánica, puede sufrir interferencias por presencia de sustancias inorgánicas susceptibles a ser oxidadas (sulfuros, sulfitos, yoduros, etc.), es por ello que la obtención de resultados y la interpretación de los mismos serán satisfactorios mediante metodologías bien definidas y respetadas (Chuquitarqui y Velásquez, 2017).

Según Ramalho (1996), existen diversos métodos para realizar una medición metodológica de la DQO presente en el efluente líquido. Entre las cuales destacan el método normalizado de oxidación al dicromato, ensayos de evaluación rápida de DQO, ensayo de oxidación al permanganato y métodos instrumentales para la determinación de la DQO. La medición de la DQO debe realizarse al inicio del proceso en el afluente y al finalizar el proceso, por la corriente de salida de líquido.

3.4. Estudios previos en relación a biorreactores confeccionados.

Según Torres, (2019), el conocimiento de la digestión anaeróbica como tecnología energética fue utilizado desde el año 1890, cuando se construyó el primer biodigestor en la india. Junto con el conocimiento de esta tecnología, comenzaron los estudios de la misma a nivel de laboratorio, buscando perfeccionar el proceso mejorando su efectividad. Es por ello que existen diversos estudios en relación a biorreactores confeccionados a bajo costo. En la tabla 3, se nombran algunos estudios realizados recientemente sobre la elaboración de digestores, indicando el material utilizado para su construcción y diversas observaciones al respecto.

Tabla 3. Estudios previos de biorreactores elaborados. Fuente de elaboración propia.

Material de tanque digestor	Observación	Referencia
Policloruro de vinilo (PVC)	Estudio no contó con medición ni control de temperatura.	(Muñoz et al., 2017)
Policloruro de vinilo (PVC)	Digestor horizontal discontinuo. Sin agitación.	(González y Violante, 2017)
Acero inoxidable 430	Estudio realizó monitoreo continuo de temperatura sin un control de la misma variable.	(Torres, 2019)
Recipiente de acero inoxidable reutilizado	El estudio se enfocó en el almacenamiento y cuantificación de biogás producido. No se midió ni controló temperatura ni agitación.	(Menna et al, 2007)
Balón de fondo redondo de 2 litros. Material de laboratorio	Estudio realizado con la utilización de material de laboratorio. No se realizó adaptación para un proceso anaeróbico.	(Serrat y Méndez, 2015)
Recipiente de vidrio transparente, con camisa de agua incorporada	Estudio realizó el diseño del equipo con material de laboratorio, lo cual aumenta el coste de la construcción del mismo.	(Ocaña, 2011)
Barril plástico (HDPE)	El estudio no consideró una medición y/o control de variables, tanto ambientales como internas del proceso.	(Galarza, 2020)

3.5. Métodos de prueba de digestores.

Debido a que los microorganismos involucrados en el proceso de digestión, son considerados anaerobios estrictos y facultativos, es importante que el equipo presente una aislación completa entre el interior y el exterior, con el fin de evitar la entrada de aire, fugas de gas metano, el cual se considera altamente contaminante en caso de liberarse a la atmósfera, como también explosivo al ser un gas combustible. Estas situaciones indeseadas pueden poner en riesgo la viabilidad del proceso y la salud y cuidado de las personas. Estudios realizados por Torres (2019) y González y Violante (2017) explican una metodología de prueba, la cual consiste en el llenado del equipo con agua y aire con la intención de encontrar fugas para realizar arreglos del mismo.

Junto con la aislación, la homogeneidad tanto de temperatura como de mezcla son primordiales en el correcto funcionamiento del proceso, por lo cual se deben realizar pruebas de funcionamiento que demuestren que el equipo cumple con los requisitos esperados para cada punto. Para el caso de la temperatura, un correcto funcionamiento se observará en el tiempo que demora la mezcla en llegar a la temperatura deseada. La homogeneidad de mezcla se debe lograr en un tiempo corto (menor a dos minutos), para asegurar así que el sistema tenga un funcionamiento correcto a lo largo del proceso. Estos métodos de prueba se describirán con mayor detalle en el capítulo 5.

4. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Objetivo general.

Evaluar la factibilidad de construcción de un biorreactor agitado de bajo costo para estudios de digestión anaerobia a escala de laboratorio.

Objetivos específicos.

Diseñar un biorreactor a escala de laboratorio considerando instrumentación y recursos de bajo costo.

Construir un biorreactor a escala de laboratorio de acuerdo a las condiciones establecidas por el diseño.

Evaluar el cumplimiento de los requisitos de operatividad, indispensables para el desarrollo de procesos fermentativos bajo condiciones anaerobias.

5. METODOLOGÍA.

La metodología se separó en 3 temas, buscando abarcar la totalidad del estudio. El primero consideró el diseño del digester anaerobio, detallando relaciones de altura/diámetro, tipos de tapas, agitadores, entre otros. El segundo tema abarcó la metodología de construcción del equipo, detallando los diferentes materiales a utilizar en la construcción, calefacción y agitación del mismo. Para el tercer tema, se especificaron los métodos de prueba de funcionamiento del equipo terminado, considerando pruebas para verificar que no existan fugas, tiempo necesario para homogenización de temperatura, correcto funcionamiento de sensores, entre otros.

5.1. Objetivo 1: Diseño de biorreactor.

El diseño del biorreactor consideró un diseño geométrico del mismo, buscando determinar las dimensiones requeridas por el equipo. También consideró el diseño del medio de agitación y de calefacción del equipo, de relevante importancia para un correcto funcionamiento del proceso.

5.1.1. Diseño geométrico de biorreactor.

El dimensionamiento del biorreactor se hizo siguiendo los criterios de Guardado, (2007) y Torres, (2019) e involucraron los siguientes pasos:

1. Se calculó el volumen total (V_{total}), sobre la base del volumen estimado de biomasa y la relación zona líquida: zona gaseosa.
2. Se consideró una relación 1:1,92 entre diámetro y altura (Torres, 2019).
3. Se calcula el radio (R_c) del volumen total (V_{total})

Diseño geométrico de cilindro.

$$V_{cilindro} = R_c^2 \cdot H_c \cdot \pi \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

V1: Volumen nominal del cilindro.

Rc: Radio del cilindro.

Hc: Altura del cilindro.

La relación diámetro: altura nombrada en el paso 2, nos da:

$$R_c = 0.26 \cdot H_c \dots\dots\dots(2)$$

Diseño de tapas.

El diseño de tapas consideró:

- (a) Selección del tipo de tapa a utilizar.
- (b) Cálculo de espesor mínimo requerido para la tapa.
- (c) Cálculo de espacio necesario para implementación de instrumentación como termómetro y motor del agitador, como también de válvulas para corrientes de entrada de biomasa, salida de líquido clarificado y gas.

Selección del tipo de tapa.

Se seleccionó el tipo de tapa que cumple los requisitos necesarios para mantener el proceso anaerobio funcional, considerando también el costo de la creación de cada tipo.

Espesor mínimo para tapa y cilindro.

Para realizar el cálculo del espesor mínimo del tanque digestor, se realizaron los siguientes pasos propuestos por Torres, (2019):

- 1) Se calcula la presión interna del tanque.

$$P_{\text{tanque}} = P_o + P_h \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

P_{tanque} : Presión de diseño del tanque (pascales).

P_o : Presión de operación:

P_h : Presión hidrostática.

La ecuación (3) define la presión del tanque. Según Torres (2019), se recomienda utilizar una presión de operación en un rango entre 0,5 a 1,5 bar.

Para el cálculo de la presión hidrostática, se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_h = \rho \cdot a \cdot h \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

ρ : Densidad o peso específico de la materia.

a: Constante de gravedad: 9,8 m/s².

h: Altura de los residuos en el tanque. 75% de la altura total del tanque digestor.

Se consideró la utilización de aguas residuales como biomasa. Según Ramalho, (1996), la densidad de las aguas residuales domiciliarias puede considerarse igual a la densidad del agua pura.

- 2) Con el valor de la presión interna del tanque, se procede a calcular el espesor mínimo para el cilindro y las tapas, utilizando las siguientes ecuaciones:

Espesor del cilindro.

$$t_1 = \frac{PR}{SE - 0,6P} + CA \dots\dots\dots(5).$$

Espesor de tapas.

$$t_2 = \frac{PD}{2SE - 0,2P} + CA \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

t₁: Espesor del cilindro.

t₂: Espesor de tapa.

P: Presión del tanque.

R: Radio interno del cilindro.

D: Diámetro interno del cilindro.

S: Valor del esfuerzo de la placa.

E: Eficiencia de la junta.

CA: Margen de corrosión.

5.1.2. Volumen de digestor:

$$V_{total} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (7)$$

Donde V₁ es el volumen del cilindro, V₂ y V₃ son los volúmenes de las tapas superiores e inferiores, respectivamente.

El tanque digestor se dividió en dos zonas. Una considera la zona líquida, donde se encuentra la biomasa a utilizar, mientras que la segunda es la zona gaseosa, la cual considera el espacio de almacenamiento de biogás mientras ocurre el proceso de fermentación (Toala, 2013).

$$V_{total} = V_l + V_g \quad (8)$$

Donde:

V_l: Volumen zona líquida (Biomasa).

V_g: Volumen zona gaseosa.

De acuerdo a Toala, (2013), el volumen de la zona líquida se define como:

$$V_l = 0,75 \cdot V_{total} \dots\dots\dots(9)$$

5.1.3. Diseño de agitador.

Para el diseño de agitador se establecieron los siguientes criterios a cumplir:

- (a) Asegurar un tiempo de mezcla inferior a 2 minutos.
- (b) El material debe ser resistente a las condiciones de trabajo (corrosión, rangos de temperatura).

- (c) El agitador debe tener una forma adecuada para la homogeneización de fluidos relativamente viscosos.

Se siguieron las relaciones descritas por Raje, Gawande y Khan, (2017), para el dimensionamiento correcto del agitador a utilizar. Estas relaciones se encuentran en la tabla 4 del anexo B.

5.1.4. Diseño medio de calefacción.

Como criterio para el sistema de calefacción se consideraron los siguientes aspectos:

- (a) Rápida transferencia de calor al medio de cultivo.
- (b) Flexibilidad de operación.
- (c) Seguridad en la operación.
- (d) Fácil acceso para mantenimiento.

5.2. Objetivo 2: Construcción del biodigestor.

5.2.1. Selección de material de tanque.

Se consideraron tres materiales para la fabricación del tanque digestor, los cuales son vidrio, pvc y acero inoxidable 304 reciclado. Se tomaron cuatro factores para tomar la decisión de cual material ocupar. Los criterios elegidos fueron la resistencia a corrosión, resistencia a rangos de temperatura, resistencia a presión y costo estimado del material y fabricación. Para el caso del acero inoxidable, se consideraron los diferentes tipos de soldaduras a utilizar. La tabla 1 del anexo C muestra los factores para cada material. La tabla 2 del anexo C muestra los diferentes tipos de soldaduras que se consideraron.

5.2.2. Materiales de biodigestor.

Se seleccionaron los materiales a utilizar para la construcción y monitoreo del digestor. Los cuales se dividieron en tres categorías:

- (a) Instrumentos de medición: considera los equipos utilizados para hacer las mediciones del proceso. Estos son termómetro para medir la temperatura y sensor de pH.
- (b) Válvulas para flujos: considera las entradas y salidas del sistema. Estos son, corriente de afluente, corriente de efluente, corriente salida de lodos y corriente salida de gas.
- (c) Materiales de conexión: considera los materiales utilizados para conectar piezas del equipo. Estos materiales son niples, conector tetilla y manguera de nivel.

5.2.3. Selección de agitador.

Se consideraron diferentes tipos de agitadores, entre los cuales destacan cuatro tipos de impulsores diferentes (pala, hélice, turbina y helicoides). Los diferentes tipos de impulsores

con una descripción se observan en la tabla 3 del anexo B, de la cual se consideró la selección correcta del agitador a utilizar.

5.2.4. Modo de calefacción.

Posterior al diseño del modo de calefacción realizado, se consideraron dos opciones a aplicar en el sistema. La primera fue la utilización de un serpentín integrado al interior del tanque digestor, de cobre recocido, el cual será alimentado mediante una corriente de agua caliente, proveniente de un baño termostático con la finalidad de darle la temperatura requerida al proceso. La segunda opción a considerar fue la implementación de un serpentín adherido a la pared exterior del tanque, del mismo material. Se realizó una matriz de decisión con las ventajas y desventajas de utilizar la primera o segunda opción. Esta matriz se observa en la sección resultados.

5.3. **Objetivo 3: Pruebas de funcionamiento.**

5.3.1. Prueba hidrostática.

El fin de la prueba hidrostática es la verificación de una construcción correcta del recipiente, el cual tendrá un aumento de presión interna durante el proceso. De acuerdo a León, (2001), la prueba se debió realizar de la siguiente forma:

El recipiente se sometió a una presión 1,5 veces la presión de diseño y se conservó durante el tiempo necesario para verificar que no existen fugas en ningún cordón de soldadura. Como su nombre lo indica, esta prueba se realizó con agua.

Al momento de realizar esta prueba, León, (2001), recomienda tener las siguientes precauciones:

- (a) Por ningún motivo se debe exceder la presión de prueba señalada en la placa.
- (b) En recipientes a presión usados, que presenten corrosión en cualquiera de sus componentes, se deberá reducir la presión de prueba de forma proporcional.
- (c) Siempre que sea posible, evitar realizar pruebas neumáticas, debido a que son peligrosas y pueden generar daños severos en el equipo.

5.3.2. Prueba de elasticidad.

Esta prueba se debió efectuar simultáneamente con la prueba hidrostática. Su objetivo fue el de verificar el comportamiento elástico del material de fabricación del recipiente y el procedimiento para llevarla a cabo lo describe León, (2001) a continuación:

- (a) Primero, se llena el recipiente a probar con agua hasta que por el punto más alto del mismo escape el agua una vez abierto el venteo.
- (b) Se cierra la válvula de venteo y se comienza a inyectar agua a fin de elevar la presión, el agua que se introduzca para este fin, se deberá tomar de una bureta graduada para cuantificar de manera exacta el agua inyectada para elevar la presión interna hasta llegar a la presión de prueba.
- (c) Se mantendrá la presión de prueba durante el tiempo suficiente para verificar que no existan fugas y posteriormente, se baja la presión hasta tener nuevamente una presión atmosférica en el recipiente. Es de suma importancia recoger el agua retirada para bajar la presión, ya que se realizara una comparación entre el volumen inyectado para aumentar la presión y el volumen del agua retirada. Esta comparación indicara si las deformaciones sufridas por el recipiente mientras se sometió a la prueba hidrostática, rebasaron el límite elástico.

5.3.3. Prueba de temperatura.

La prueba de temperatura se realizó de forma casera, con la finalidad de medir el tiempo requerido para alcanzar la temperatura requerida en el proceso. Para ello se realizaron los siguientes pasos:

- (a) Se llena el recipiente hasta el 75% de su volumen total con agua de llave.
- (b) Se realiza la medición de la temperatura del agua de llave por duplicado, utilizando el termómetro adherido al tanque y un segundo termómetro, con el cual se realizara la medición de temperatura del agua al exterior del equipo.
- (c) Se calienta el agua de la llave mediante la activación del calefón, hasta llegar a la máxima temperatura de operación del mismo. Se debe medir la temperatura del agua caliente, también por duplicado, utilizando dos termómetros para una lectura más precisa.
- (d) Se conecta la llave de agua con el serpentín calefactor mediante una manguera, evitando fugas de agua para maximizar el flujo a través del serpentín.
- (e) Con un cronometro se mide el tiempo que requiere el agua para recorrer el serpentín con el fin de conocer el flujo de la corriente.
- (f) Finalmente, se mide el tiempo que se requiere para que el agua que se encuentra en el interior del tanque alcance la temperatura del serpentín.

Estos pasos se realizaron 5 veces para aumentar la precisión de la prueba.

5.3.4. Prueba de agitación.

La prueba de agitación se realizó buscando comprobar dos situaciones relacionadas con la agitación del sistema. La primera fue comprobar que el sistema de agitación tiene la capacidad de homogeneizar la mezcla completa en el sistema. Mientras que la segunda

situación está relacionada con el tiempo requerido por el sistema para lograr un estado homogéneo. Ambas pruebas se realizaron en simultáneo siguiendo los siguientes pasos.

- (a) Se añade al tanque un líquido que contenga una cantidad relevante de sólidos suspendidos hasta completar un 75% del volumen total del reactor. Se mantiene una muestra de 100 [mL] del líquido inicial.
- (b) Se bloquean las corrientes de entrada y salida del tanque y se procede a prender el motor para comenzar la agitación.
- (c) Se abre la válvula de corriente de líquido clarificado y se retira una muestra de 100 mL de la mezcla. Este paso se realiza cada 1 minuto.
- (d) Se realiza el paso (c) durante 6 minutos, sacando muestras por duplicado.
- (e) Las muestras se almacenan y comparan la concentración de sólidos suspendidos de las muestras con la muestra del líquido inicial.
- (f) La muestra que indique una concentración de sólidos suspendidos con una similitud mayor a un 90% con la muestra del líquido inicial, describirá el minuto en el que se logra la homogeneidad de la mezcla, respondiendo a las dos situaciones descritas anteriormente.

Esta prueba se realizó dos veces para tener un resultado más robusto de la misma y así determinar de manera correcta el tiempo de homogeneidad del sistema.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

6.1. Diseño de biodigestor.

6.1.1. Diseño geométrico del biorreactor.

Se consideró un digestor con capacidad para almacenar 5 litros de biomasa líquida (zona líquida) para realizar el diseño del equipo. En la tabla 4. se nombran las medidas obtenidas de la utilización de las ecuaciones (1), (2), (8) y (9) de diseño para el digestor.

Tabla 4. Dimensiones obtenidas para tanque digestor. Fuente de elaboración propia

Ítem	Unidad	Valor
Volumen zona líquida	Litros	5
Volumen zona gaseosa	Litros	1,7
Volumen total.	Litros	6,7
Diámetro.	Centímetros	16,4
Altura.	Centímetros	31,6
Altura zona líquida	Centímetros	24.87
Altura zona gaseosa	Centímetros	6.73

6.1.2. Presión interna de trabajo y espesor mínimo.

Utilizando las ecuaciones (3) y (4), se obtuvieron los valores de presión hidrostática y la presión interna de trabajo. Se utilizó una presión de operación de 1,5 bar (21,76 lb/pulg²). Los resultados se muestran a continuación, en la tabla 5.

Tabla 5. Presión hidrostática y presión interna de trabajo.

Parámetro	Unidad	Valor
Presión hidrostática.	[lb/pulg ²]	0,353
Presión interna de tanque.	[lb/pulg ²]	22,11

Fuente (Torres, 2019).

Luego de calcular la presión interna de trabajo, se realizó el cálculo del espesor mínimo tanto para el tanque cilíndrico como para las tapas, utilizando las ecuaciones (5) y (6), respectivamente. Los parámetros requeridos por las ecuaciones como el resultado de ambas se observa en la tabla 6.

Tabla 6. Espesor mínimo para cilindro y tapa de acero inoxidable.

Parámetro	Unidad	Valor
Radio interno cilindro (R)	Pulgadas	3,35
Diámetro interno cilindro (D)	Pulgadas	6,7
Valor del esfuerzo de la placa de acero inoxidable 430 (S)	lb/pulg ²	65.267
Eficiencia de la junta (E)	Adimensional	0,6
Margen de corrosión (CA)	Pulgadas	0,125
Espesor del cilindro (t1)	Milímetros	3,22
Espesor de la tapa (t2)	Milímetros	3,22

Fuente (Torres, 2019).

6.1.3. Diseño de tapas.

Para el diseño de las tapas se consideró el uso de tapas de geometría plana. La decisión se basó fundamentalmente en el precio de construcción de este tipo, el cual se cataloga como el más económico. Si bien el tipo de tapa toriesférica se planteó como el adecuado para el equipo, ya que presenta una mayor resistencia a presiones internas del sistema, el costo de la mano de obra relacionada a la fabricación de este tipo de tapa descartó la opción como viable.

6.1.4. Diseño de agitador.

El diseño consideró la implementación de un agitador tipo helicoidal. Este tipo de agitador cumple con las necesidades del proceso, ya que tiene una buena funcionalidad para fluidos viscosos, genera movimiento de solidos suspendidos decantados, lo que produce una mayor homogeneidad de la mezcla y no requiere de una velocidad de giro rápida para efectuar su función.

Se seleccionó acero inoxidable como material para la construcción del agitador, debido a que este material tiene la capacidad de resistencia a las condiciones internas del proceso (resistencia a la corrosión, resistencia a rangos de temperatura, resistencia a la deformación debido a material viscoso).

De las correlaciones descritas por Raje, Gawande y Khan, (2017), se realizo el diseño geometrico del agitador. Los valores obtenidos se observan en la tabla 7.

Tabla 7. Dimensiones geometricas de agitador tipo helicoidal.

Parámetros	Unidad	Valor
Altura agitador	Centímetros	13
Diámetro agitador	Centímetros	9
Altura 1 helicoide	Centímetros	9
Cantidad de helicoides		1,5

Fuente. (Raje, Gawande, y Khan, 2017).

6.1.5. Diseño de sistema de calefacción.

Para el diseño del sistema de calefacción se consideraron dos posibilidades. El uso de un serpentín interno y el de un serpentín externo. El material a utilizar fue cobre recocido, con un diámetro exterior de 3/8". Ambos sistemas presentan ventajas y desventajas para el proceso, las cuales son descritas en la tabla 8.

Tabla 8. Opciones para sistema de calefacción.

Tipo de calefacción.	Ventajas.	Desventajas.
Serpentín externo	(a) Fácil implementación. (b) Su mantención no afecta al sistema interno. (c) No requiere detención del proceso para manipulación.	(a) Menor área de transferencia de calor. (b) Necesidad de aislante térmico para conducir calor hacia el interior del tanque. (c) Mayor tiempo necesario para lograr temperatura objetivo.
Serpentín interno	(a) Fácil implementación. (b) Mayor área de transferencia de calor. (c) Menor tiempo necesario para lograr temperatura objetivo. (d) Favorece la homogeneización al generar turbulencia.	(a) Acumula mayor suciedad en las paredes externas del serpentín. (b) Corre el riesgo de sufrir corrosión, lo que generaría fugas pudiendo contaminar la mezcla. (c) El serpentín puede actuar como anclaje para que microorganismos generen bio films, lo cual no es adecuado. (d) Requiere detención del proceso para su manipulación.

Fuente. Elaboración propia.

Se decidió implementar un serpentín externo, debido a que, aunque ambos presentan ventajas y desventajas significativas al proceso, la utilización de un serpentín externo asegura un menor riesgo de contaminación, ya que no hay riesgo de formación de bio film, y alteración negativa a la mezcla utilizada para los estudios. Además de presentar mayor facilidad para su limpieza.

6.2. Construcción de biodigestor.

6.2.1. Materiales para construcción de tanque.

Selección de material.

Se seleccionó acero inoxidable 304 reciclado como material a utilizar para el diseño y construcción del tanque digestor. Los motivos se enumeran a continuación:

- (a) Junto con el vidrio, ambos materiales cumplen los requisitos mínimos de funcionamiento (resistencia a la corrosión, resistencia a rangos de temperatura, resistencia a la presión interna). El pvc por su parte, tiene una buena reacción a la mayoría de los factores requeridos, considera un costo bajo de construcción y adquisición de material, pero no logra asegurar un correcto funcionamiento para rangos de temperatura termofílico debido a que, a temperaturas sobre 60°C, el material presenta deformación, pudiendo provocar filtraciones y contaminación del proceso.
- (b) El factor principal a la hora seleccionar el material fue el costo del mismo. El acero inoxidable 304 reciclado tiene un valor aproximado de \$3.000 por kilo, necesiándose 10 kilos para la construcción completa del tanque, tapas y base, teniendo un valor total de \$30.000. En cambio, la construcción del equipo utilizando vidrio, presentó un costo de \$600.000, lo cual sobrepasó el presupuesto disponible.

Para la construcción del tanque digestor se utilizaron los siguientes instrumentos y materiales: Los instrumentos de medición, las válvulas utilizadas y los materiales de conexión se observan en el anexo D.

Instrumentos de medición.

- (a) Termómetro análogo: instrumento instalado en la tapa superior del tanque, con el fin de realizar una medición constante de la temperatura interna del proceso.
- (b) Sensor de pH: instrumento de uso remoto. Se requiere toma de muestra para realizar mediciones respectivas. Su control es importante mas no crítico para el funcionamiento del proceso. Es por esto que las muestras se realizan en forma remota.

Válvulas para flujos.

- (a) Afluente: válvula tipo bola 3/8'' para líquido. Cierre rápido para permitir el ingreso de mezcla evitando que ocurran fugas o ingreso de aire al sistema. Se debe mantener en posición cerrado durante el proceso de fermentación.
- (b) Efluente: válvula tipo bola 3/8'' para líquido. Cierre rápido para permitir salida de mezcla al finalizar proceso evitando fugas o ingreso de aire al sistema. Se debe mantener en posición cerrado durante el proceso de fermentación.
- (c) Salida de biogás: válvula tipo bola 3/8'' para gases. Cierre rápido para permitir flujo de biogás hacia colector de gas y evitar ingreso de aire. Al principio del proceso debe

mantenerse en posición cerrado. Una vez el proceso está en funcionamiento, la válvula pasara a posición abierto para enviar el biogás hacia el colector.

- (d) Salida de lodos: válvula tipo bola 1/2'' para líquidos de acero inoxidable. Cierre rápido para evitar la salida de la mezcla durante el proceso de fermentación. Se debe mantener en posición cerrado durante todo el proceso. Utilizar solamente para tomar muestras de lodo y para drenar mezcla.

Materiales de conexión.

Los siguientes materiales fueron utilizados para unir y conectar las piezas del equipo.

- (a) Terminal tetilla: Utilizados para unir las mangueras de las corrientes de afluente, efluente y biogás a sus respectivas válvulas.
- (b) Niples acero inoxidable: utilizados para conectar válvulas y termómetro a tapa superior.
- (c) Punta de hilo inoxidable: utilizada para conectar válvula salida de lodo a tanque digestor.
- (d) Manguera de nivel: utilizada para ingresar el afluente, retirar efluente y retirar el biogás generado en el proceso.

En la tabla 9 se enumeran la cantidad de materiales de conexión utilizados.

Tabla 9. Materiales de conexión.

Material de conexión	Medida	Cantidad
Terminal tetilla	3/8''	4
	1/2''	1
Niples acero inoxidable	3/8''	2
	1/2''	1
Punta de hilo inoxidable	1/2''	1
Manguera de nivel	3/8''	Indefinido*

Fuente. Elaboración propia.

*: El largo necesario variará con la distancia entre el tanque digestor y los equipos externos (recipiente para almacenar biomasa y recipiente recolector de biogás).

Material de tanque y tapa.

Para la construcción del tanque se utilizó acero inoxidable 304, adquirido por empresa *Santiago Adriazola Tamayo*. Se adquirió un tubo de acero inoxidable de 3 milímetros de espesor, y 50 centímetros de largo, junto a una plancha de acero inoxidable de 3 milímetros de espesor. La figura 7 muestra los materiales.



Figura 7. Tubo y plancha de acero inoxidable.

Soldadura.

Entre las opciones de soldadura a utilizar (Soldadura eléctrica, TIG y MIG), se decidió utilizar la técnica de soldadura eléctrica. El motivo que determinó el uso de esta técnica fue el costo de la misma, considerado el más económico entre las tres opciones, como también el conocimiento del soldador disponible a realizar el trabajo. De acuerdo a Rodríguez, (2001), esta técnica es aceptada para el proceso de soldadura de materiales de acero inoxidable.

Para realizar una soldadura en material de acero inoxidable, se debió conseguir soldadura especial. El tipo de soldadura utilizada fue soldadura 3001, especial para soldar acero inoxidable. La figura 8 muestra el proceso de soldadura.



Figura 8. Proceso de soldadura.

Construcción de tapas.

Se consideró la implementación de dos tapas para el equipo. La tapa de fondo, consiste en una tapa plana con inclinación para promover el desplazamiento de lodo hacia la válvula de salida de lodo. Su inclinación es de 21 grados, permanece soldada al tanque digestor para asegurar hermeticidad y resistir de mejor manera la presión interna del sistema. La figura 9 muestra el resultado de la tapa de fondo soldada al tanque digestor.



Figura 9. Fondo de acero inoxidable soldado a tanque digestor.

La tapa superior consistió en una tapa plana cuadrada, a la cual se le implementaron 8 pernos, los cuales cumplen la función de cerrar y sellar a presión el recipiente, junto con tuercas tipo mariposa. La figura 10 muestra la tapa inicial sin orificios.



Figura 10. Tapa superior con pernos y tuercas tipo mariposa.

Posteriormente se realizaron 5 orificios en la tapa para conectar las válvulas de afluente, efluente y salida de gas, la implementación del termómetro análogo y la conexión en el centro de la misma del motor del agitador.

Para evitar que se produjeran filtraciones entre los orificios y las válvulas, se utilizaron niples y conectores de acero inoxidable, los cuales fueron soldados a la tapa para así asegurar la hermeticidad de la misma. La figura 11 muestra la tapa final, con las válvulas, termómetro y motor correspondiente.



Figura 11. Tapa superior con válvulas y sensor de temperatura incorporado.

Para asegurar la hermeticidad del sistema, se adiciono un O-Ring de 11 milímetros de diámetro al interior de la tapa, el cual se adhirió al equipo utilizando silicona de alta temperatura (silicona roja). La figura 12 muestra el O-Ring utilizado.



Figura 12. O-Ring de sello tapa superior adherido con silicona roja.

Dimensiones reales tanque digestor.

Para tomar las dimensiones reales del tanque digestor construido, se dividió este en dos zonas.

La primera zona considera un cilindro, que recorre desde la tapa superior hasta la parte más alta del fondo diagonal soldado. La segunda zona constituye el espacio formado entre las paredes del tanque y el fondo, el cual tiene una inclinación para facilitar la salida de lodos y limpieza del tanque, de 21,6°, valor obtenido de una relación trigonométrica simple. En la tabla 10 se observan los valores obtenidos a la dimensiones reales del tanque digestor.

Tabla 10. Dimensiones reales tanque digestor.

Parámetro	Unidad	Valor
Largo zona 1	Centímetros	33
Largo zona 2	Centímetros	7
Diámetro cilindro	Centímetros	16
Largo fondo	Centímetros	19
Volumen zona liquida	Litros	5,54
Volumen zona gaseosa	Litros	1,85
Volumen total	Litros	7,39
Espesor cilindro	Milímetros	4
Espesor tapa y fondo	Milímetros	4

Fuente. Elaboración propia.

6.2.2. Sistema de agitación

El sistema de agitación se fabricó utilizando una varilla de acero de 5 milímetros de diámetro, a la cual se le soldó un helicoide fabricado con una plancha de acero inoxidable de 0,5 milímetros de espesor. El tipo de soldadura utilizada fue tipo eléctrico, más conocido como técnica de arco manual. La tabla 11 muestra las dimensiones geométricas del agitador fabricado.

Tabla 11. Dimensiones geométricas reales del agitador tipo helicoidal.

Parámetro	Unidad	Valor
Diámetro agitador	Centímetros	7,7
Largo agitador	Centímetros	15,9

Fuente. Elaboración propia.

El sistema de agitación fue fabricado con acero inoxidable, ya que el agitador debe resistir las condiciones internas del proceso. El diámetro de la varilla fue necesario para poder realizar el proceso de soldadura. La figura 13 muestra el agitador tipo helicoidal fabricado.



Figura 13. Agitador tipo helicoidal de acero inoxidable.

6.2.3. Sistema de calefacción.

El sistema de calefacción se fabricó utilizando un rollo de 15 metros de tubo de cobre recocido de 3/8" de diámetro. Se procedió a enrollar el tubo por el exterior del tanque cilíndrico hasta completar 30 centímetros de largo de tanque, considerando desde la parte superior del mismo hacia el fondo. La figura 15 muestra el serpentín ya instalado en el exterior del tanque.



Figura 14. Tanque digester con serpentín externo de calefacción instalado.

Para favorecer la transferencia de calor hacia el interior del reactor y evitar pérdidas de energía, se recubrió el serpentín con una plancha de corcho de 3 milímetros de espesor, la cual se selló con cinta multiuso marca Topex, la cual, junto con la plancha de corcho también cumplen la función de aislar térmicamente el exterior del equipo para evitar quemaduras en su manipulación. Mediante la ecuación de Fourier, se demostró la utilidad de implementar una plancha de corcho como aislante. El serpentín, utilizado para calentar el interior del tanque a la temperatura máxima de trabajo (60°C), entrega aproximadamente $1.385,30$ $[\text{kW}/\text{m}^2]$ de calor. En cambio, al implementar una plancha aislante de corcho, se producirán solo pérdidas de calor de $0,449$ $[\text{kW}/\text{m}^2]$. En el anexo H se explica la ecuación de Fourier y los parámetros utilizados.

La figura 15 muestra el tanque digestor con la capa aislante que recubre al serpentín calefactor.



Figura 15. Pared externa de tanque digestor con aislante recubierto.

Luego de las etapas de construcción del equipo, se consideró la realización completa, lo cual consideró la construcción del tanque digestor, el medio de calefacción, con su respectiva aislación térmica y el agitador. Las figuras 16 y 17 muestran el tanque digestor finalizado destacando sus partes.



Figura 16. Tanque digestor finalizado.

- 1) Recubrimiento aislante; 2) Entrada cañería serpentín externo; 3) Válvula descarga de lodos;
- 4) Tapa superior plana; 5) Base soporte equipo.

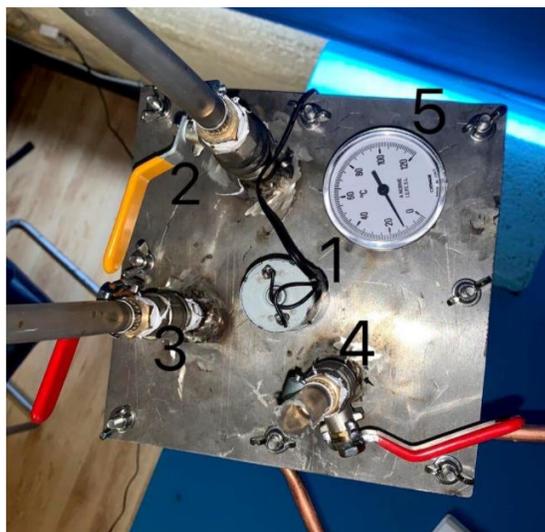


Figura 17. Tapa superior tanque digestor.

- 1) Motor agitador; 2) Corriente salida de gases; 3) Corriente entrada afluente; 4) Corriente salida liquido clarificado; 5) Sensor de temperatura análogo.

6.2.4. Costo de materiales.

Tabla 12. Costo de materiales y servicios para construcción.

Ítem	Cantidad	Costo (\$)
Acero inoxidable	10 [kg]	30.000
Sensor pH	1	38.000
Termómetro	1	17.254
Válvulas liquido	2	2.914
Válvula para gas	1	2.576
Válvula acero inoxidable	1	13.300
Cobre recocido para serpentín	15 [mts]	20.590
Soldadura	1 [kg]	12.000
Niples y conectores acero inoxidable	5	17.950
Materiales para soldador.	4 discos	8.600
Golillas y tornillos para motor	6 Golillas 6 Tornillos	2.323
Tuercas y pernos para tapa	8 Tuercas mariposa 8 Golillas 8 Pernos	3.760
O' ring	1	5.000
Plancha corcho 3mm espesor	1	3.250
Cinta aislante tapa goteras	1 rollo	9.000
Mano de obra soldador		45.000
	Total	231.517

Fuente. Elaboración propia.

6.3. Pruebas de funcionamiento.

Las pruebas de funcionamiento debieron ser re-agendadas debido a falta de equipos esenciales para la realización de las mismas. La adquisición de los equipos se debe a dos situaciones particulares. Los equipos pertenecientes a las instalaciones de la Universidad del Bío Bío se encuentran incapacitados debido a la situación sanitaria nacional y mundial. Esta situación dificulta la compra de equipos para realizar pruebas de manera casera (momentáneamente). La segunda situación es el elevado precio de arrendar equipos de laboratorio para realizar las pruebas pertinentes, lo que produciría un sobrepaso al presupuesto aceptado.

A continuación se dará una breve descripción de los resultados esperados para cada prueba y los motivos que podrían significar un error en las mismas.

6.3.1. Prueba hidrostática.

De acuerdo a los valores obtenidos, la presión de operación es de 1,52 [bar]. Por lo que esta prueba debe tener la capacidad de aumentar, con el ingreso de agua al sistema, la presión interna hasta 2,3 [bar], la cual se mantendrá por un rango de 10 minutos para comprobar la resistencia a la presión del material. De acuerdo a las propiedades del material, este debería resistir de forma correcta este aumento de presión. Por lo que, en caso de ocurrir una fuga de líquido se puede deber a una de las siguientes opciones:

- (a) Falla en la soldadura: para el caso de verificar una fuga en una de las uniones soldadas del equipo, se procederá a realizar nuevamente la soldadura en el área afectada con el fin de reparar el sector y evitar nuevas fugas.
- (b) Falla en la unión de válvulas o material de conexión con tanque: esto también se debe a fallas en la soldadura entre la tapa del tanque con los equipos de conexión, ya sean nipples, puntas de hilo o la unión entre el motor del agitador y la tapa superior del tanque. Ante alguna falla en estas uniones se procederá a reparar, mejorando la soldadura o añadiendo una capa aislante en el lugar con fuga.
- (c) Falla en la hermeticidad de la tapa superior: Donde existe una mayor posibilidad de fuga es en la unión entre el tanque digestor y la tapa superior ya que esta se encuentra sellada a presión por unos pernos y la utilización de un O' ring aislante. En caso de presentar fugas en la unión se procederá a reparar las fallas buscando un material aislante que se adecúe mejor al proceso bajo presión. En caso de persistir la falla se deberá diseñar una nueva tapa que pueda cumplir los requisitos.

En caso de ocurrir una o más de las posibles situaciones detalladas, se deberá realizar la reparación del área con problemas y repetir la prueba hidrostática hasta confirmar su correcto funcionamiento.

6.3.2. Prueba de elasticidad.

Debido a que la prueba de elasticidad se realiza de manera simultánea a la prueba hidrostática, la duración de esta también será de 10 minutos. Se espera que esta prueba compruebe que el equipo resiste el aumento de presión interna sin producirse deformación del material. El material utilizado debería superar la prueba de elasticidad con éxito debido a su resistencia a la presión muy superior a la presión de prueba. Debido a que la prueba de elasticidad está dirigida a medir la capacidad del material del tanque a resistir un aumento de presión, esta prueba determinara la factibilidad del material utilizado para un correcto funcionamiento del proceso. Es por esto que en caso de presentarse problemas en la prueba, la solución será la de reemplazar el material del tanque por un tipo de acero inoxidable más resistente al aumento de presión o de mayor espesor.

6.3.3. Prueba de temperatura.

Siguiendo los pasos explicados en la sección 5.3.3, se espera lograr una buena transferencia de calor desde el serpentín calefactor hacia el interior del tanque. En caso de presentarse problemas en el control de temperatura, los cuales se pueden observar en la incongruencia entre la temperatura del agua caliente que recorre el serpentín y la temperatura medida en el interior del tanque luego de unos minutos de funcionamiento del proceso. Estos fallos pueden deberse a dos situaciones:

- (a) Error de calibración de termómetro: puede ocurrir que el termómetro instalado en la tapa superior del tanque digestor presente problemas de medición. Esto puede significar una mala calibración del mismo o un error de fabricación. Para verificar el problema se debe retirar una muestra del agua introducida al interior del tanque y hacer una medición respectiva de temperatura con un segundo termómetro. De ser este el caso se deberá realizar un cambio del equipo medidor de temperatura y repetir la prueba.
- (b) Mal intercambio de calor entre serpentín externo e interior del tanque: en caso de que el intercambio de calor no sea el suficiente, deberá considerarse la opción de reemplazar el serpentín externo por uno interno. Como la opción de utilizar un serpentín interno puede acarrear problemas de proceso se considerará la utilización de un fluido con mejores capacidades caloríficas (aceite o vapor de agua).

Para poder determinar una de las situaciones nombradas, se realizará la prueba por una duración de 10 minutos. En caso de no presentar variaciones en la temperatura interna del sistema habrá que comprobar ambas situaciones.

6.3.4. Prueba de agitación.

Se espera que el proceso de agitación genere una homogeneización correcta en un tiempo menor o igual a dos minutos. Esto significará que el agitador de tipo helicoidal cumplirá los requisitos de agitación requeridos para el proceso.

En el caso que los resultados de la prueba arrojen errores, se deberán considerar las siguientes opciones:

- (a) Velocidad de agitación: una mala homogeneización de la mezcla puede deberse a que la velocidad de agitación es menor a la requerida. La manera de solucionar este problema será reemplazando el motor del agitador por uno más potente.
- (b) Geometría de agitador: el tipo de agitador y la forma del mismo podría ser el motivo de una mala homogeneización del proceso. Para buscar solucionar este problema se necesitara diseñar un tipo diferente de agitador que se relacione con la velocidad de agitación del sistema. Con el fin de comprobar que la geometría del agitador es el problema, luego de diseñar y construir un nuevo tipo de agitador, se deberá realizar la prueba completa y verificar los nuevos resultados, para comprobar que el problema se solucionó.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones.

A partir de la realización de este trabajo se pudo concluir que:

Fue posible diseñar un biorreactor anaerobio, considerando el diseño geométrico del equipo, el diseño de medio de calefacción y de agitación del mismo.

Fue posible construir un biorreactor de bajo costo utilizando material reciclado y considerando la implementación de un sensor de temperatura, medidor externo de pH, control de temperatura independiente del equipo, entrada de corriente de biomasa y salidas para lodos, biogás y líquido clarificado.

Las pruebas de funcionamiento no pudieron realizarse, esto debido a la imposibilidad de acceso a los laboratorios para hacer uso de equipos esenciales para estas pruebas. Aun así se describió el protocolo a seguir y la forma de solucionar los posibles errores que pueden ocurrir al realizarse las pruebas.

El monto del equipo fue de \$231.517 pesos chilenos (8 UF), el cual es mayor al precio esperado (5,5 UF) pero aun así se adecuó a un precio accesible equivalente a un 0,5% del valor comercial de referencia. Lo que cumple con el objetivo general del estudio de fabricar un equipo de bajo costo.

Recomendaciones.

Antes de colocar en uso el equipo, se debe comprobar efectivamente que este cumpla los requisitos mínimos para realizar procesos de digestión anaeróbica, por lo que se recomienda dar un espacio de realización a las pruebas de funcionamiento de la manera más completa posible.

El equipo no considera la implementación de un equipo externo para almacenar el biogás generado, por lo que la implementación de un recipiente capaz de almacenar el biogás es recomendado.

Se recomienda la implementación de un gasómetro para el caso de que sea necesario medir la cantidad de biogás producido durante el proceso.

El acero inoxidable 304 presenta una baja resistencia a la corrosión por pitting al estar en contacto con fluido con altas concentraciones de cloruro, por lo que se recomienda evitar la utilización de agua de mar o mezclas con contenidos de sal cloruro.

8. REFERENCIAS

- Abierta, E. (2018). *energiaabierta.cl*. Obtenido de <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/253790/balance-energetico-2018/>
- Alzate Rodriguez, E. J., Montes Ocampo, J. W., & Silva Ortega, C. A. (2007). *Medición de temperatura: sensores termoeléctricos*. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- ambiente, M. d. (01 de Junio de 2016). *Biblioteca del congreso nacional de chile*. Obtenido de <https://www.leychile.cl/N?i=1090894&f=2016-06-01&p=>
- askix.com*. (s.f.). Obtenido de askix.com: https://www.askix.com/pipa-de-agua_2.html
- Cabrera, A., & Durazno, G. (2016). *Diseño y adecuación de una unidad de biodigestión*. Guayaquil, Ecuador: Escuela superior politecnica del litoral.
- Castillo, V. (2013). *Diseño y calculo de un agitador de fluidos*. Concepción, Chile: Universidad del Bio-Bio.
- Chavez Porras, A. (2007). *Uso de lodo seco de estacion de tratamiento de agua y agregado de escombros en la fabricacion de ladrillos de cemento y bloques de concreto*. Campinas: Universidad estatal de Campinas.
- Chuquitarqui De la Cruz, Y. F., & Velásquez Huanca, M. E. (2017). *Diseño y contruccion de un reactor anaerobio de flujo ascendente (R.A.F.A) para el tratamiento de aguas residuales urbanas de la ciudad de puno*. Puno, Peru: Universidad nacional del altiplano.
- Corcho24. (s.f.). *corcho24.es*. Obtenido de corcho24.es: <https://corcho24.es/propiedades-del-corcho/>
- Doran, P. (1995). *Bioprocess engineering principles*. San Diego: Academic press.
- FAO. (2011). *Manual de Biogas*. Santiago, Chile: Proyecto CHI/00/G32.
- Flores Paltan, F. G. (2014). *Diseño y construccion de un biorreactor anaerobio en fase liquida para tratar aguas residuales de curtiembre*. Chimborazo, Ecuador: Escuela de ciencias quimicas, facultad de ciencias, escuela superior politecnica de chimborazo.
- Galarza Sainz, S. (2020). *Elaboración de un biodigestor a escala de laboratorio*. La Habana, Cuba: Universidad de Ciencias pedagogicas "Enrique José Varona".
- González Nava, J. M., & Violante Gavira, A. E. (2017). Prototipo de digestor anaerobio para a producción de biogás. *Jovenes en la ciencia*, 2393-2397.

- Gonzalez, J., Laborde, M., Gonzalez, M. P., Ayastuy, J., & Gutierrez, M. (1994). Transformacion catalitica del gas natural. I. El gas natural: Propiedades y aplicabilidad. *Centro de informacion tecnologica*, 11-17.
- Guardado Chacon, J. A. (2007). *Diseño y construccion de plantas de biogas sencillas*. La Habana, Cuba: Cubasolar.
- Hernandez Curiel, C. E., Benítez Baltazar, V. H., & Pacheco Ramírez, J. H. (2015). *Desarrollo de un sistema de medición de pH del agua a través de una red de sensores inteligentes*. Sonora: Universidad de Sonora.
- Huaman Gastelu, D., & Leon Flores, E. H. (2019). *Diseño y construccion de un biorreactor "Airlift" y determinacion de parametros de operacion optimos para su aplicacion en procesos fermentativos*. Lima, Peru: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- INDURA. (2010). *Manual aceros inoxidable*. Cerrillos, Chile: Indura S.A.
- Leon Estrada, J. M. (2001). *Diseño y calculo de recipientes a presion*. n/a: Inglesa.
- Libreria Giorgio. (2018). *Libreriagiorgio*. Obtenido de Libreriagiorgio: <https://www.libreriagiorgio.cl/index.php/ProductoDatos/Detalles?codigo=05078054#ver>
- Lorente, L., Collaguazo, G., Herrera, I., Saraguro, R., Lastre, A., & Cordoves, A. (2018). Diseño de biodigestor a escala de laboratorio para la digestion anaerobia e industrializacion energetica de los desechos solidos municipales. *DELOS Desarrollo Local Sostenible*, 16.
- Macías Carranza, T. J. (2016). *Prototipo de monitoreo en un reactor de discontinuo de digestion anaerobia basado en microcontroladores y sensores*. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil.
- Menéndez Gutierrez, C., & Pérez Olmo, J. M. (2007). *Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales*. La Habana, Cuba: Editorial Universitaria.
- Menna, M., Branda, J., Murcia, G., Garín, E., Beliski, G., & Moschione, E. (2007). *Metodología de bajo costo para la cuantificación de biogas en biodigestores de laboratorio*. Mar del plata: Universidad nacional de mar del plata.
- Michalopoulos, I., Lytras, G., Mathioudakis, D., Lytras, C., Goumenos, A., Zacharopoulos, I., . . . Lyberatos, G. (2018). Hydrogen and Methane Production from Food Residue Biomass Product (FORBI). *Waste and Biomass Valorization*, 2.
- Moreno Rivera, E. V., & Vanegas Gutierrez, D. F. (2017). *Diseño y construccion de un biorreactor esterilizable y de bajo costo para el estudio de crecimiento de microorganismos*. Bogota, Colombia: Universidad distrital Francisco Jose de Caldas, Facultad de ciencias y educacion.

- Muñoz Piña, L., Salvador Cruz, Y., Mojica Mesinas, C., & Acosta Pintor, D. C. (2017). Diseño, construcción y prueba de un prototipo de biodigestor anaeróbico utilizando residuos orgánicos. *TECTZAPIC*, 85-96.
- Ocaña Pérez-Cerdá, F. J. (2011). *Biodigestor anaerobio de laboratorio*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Olaya Arboleda, Y., & Gonzalez Salcedo, L. O. (2009). FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES. *Modulo para la asignatura de construcciones agricolas* (pág. 5). Palmira, Colombia: Facultad de ingeniería y administracion.
- Ortiz, G. (2011). *Introducción a la biotecnología*. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/44859916/Clase_Bioprosos-GOrtiz.pdf?1460998879=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DIntroduccion_a_los_Bioprosos.pdf&Expires=1595559580&Signature=OusMR9-Je1pwT6X-wf5Cq9VxHuWLqN~GESPSJmM0hnQXKAjktUFXW
- Pacheco Gonzalez, S. I. (2016). *Construcción y evaluación de un digestor anaerobio para la producción de biogás a partir de residuos de alimentos y poda a escala banco*. Manizales, Colombia: Universidad nacional de colombia.
- Pallás Areny, R. (2003). *Sensores y acondicionadores de señal*. Barcelona: Marcombo Boixared editores.
- PAVCO wavin. (2020). *Manual Técnico tubosistemas presion PVC*. s.f: orbia.
- Pearson, C. (s.f). *Manual del vidrio plano*. Argentina: CAVIPLAN.
- Pulido Aponte, A. E. (2016). *Diseño e implementación de un sistema de supervisión, monitoreo y control de temperatura, presion y tiempo de proceso en un sistema de digestion anaerobia de biomasa (contenido ruminal bovino) a escala laboratorio*. Bogotá: Universidad distrital francisco jose de caldas.
- Raje, A., Gawande, J., & Khan, M. (2017). Introduction about design and stress analysis of tail cone rotary agitator in horizontal feeder. *International journal of research in advent technology*, 44-51.
- Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Rincon Ramirez, M., Rincon Lizardo, N., Araujo Vilchez, I., Diaz Montiel, A., & Mata Alvarez, J. (2010). *Estabilizacion anaerobia mesofilica y termofilica de lodos activados provenientes de la industria cervezera*. Zulia, Venezuela: Universidad de Zulia.
- Rodríguez, P. C. (2001). *Manual de soldadura. Soldadura eléctrica, MIG y TIG*. Buenos Aires: Alsina.

- San Millan, A. (2018). *Estudio tecnico sobre biodigestores anaerobicos, aplicado al tratamiento de la fraccion organica de los residuos municipales*. Cantabria: Universidad de Cantabria.
- Scheel, C., & Aguiñaga, E. (2017). *La economia circular, una alternativa a los limites del crecimiento lineal*. Monterrey, Mexico: EGADE Business School.
- Serrat Díaz, M., & Méndez Hernández, A. A. (2015). Construcción y validación experimental de un biorreactor artesanal tipo tanque agitado para fermentaciones sumergidas a escala de laboratorio. *Centro de estudios de biotecnologia industrial*, 362-375.
- SISS. (24 de Diciembre de 2019). *Informe de gestión del sector sanitario*. Obtenido de Informe de gestión del sector sanitario: <http://www.siss.gob.cl/586/w3-article-17723.html>
- Taipe Castro, J. A. (2019). *Diseño de un biodigestor para mejorar la obtencion de biogás y biol*. Huancayo: Universidad nacional del centro del peru.
- Toala Moreira, E. E. (2013). *DIseño de un biodigestor de polietileno para la obtencion de biogas a partir del estiércol de ganado en el tancho veronica*. Riobamba, Ecuador: Escuela superior politecnica de chimborazo.
- Torres Pijal, B. J. (2019). *Construcción de un biodigestor a escala de laboratorio para producción de biogas con digestión anaerobia seca a partir de residuos solidos domesticos*. Ibarra, Ecuador: Universidad tecnica del norte.
- Yanirias, L., & Lixis, R. (2010). Tratamiento de residuales anaerobico. Aspectos constructivos y de diseño. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de azúcar*, 21-27.

9. ANEXOS.

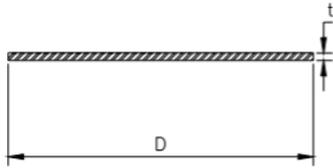
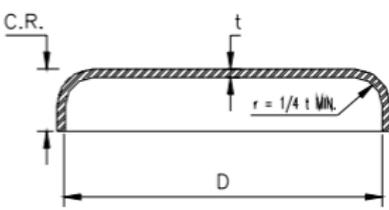
Anexo A. Composición biogás.

Tabla 1. Composición media del biogás en función del sustrato utilizado. Fuente. (Taípe, 2019).

Componente	Fórmula	Unidad	Aguas residuales	Residuos agrícolas y ganaderos	Gas de vertedero
Metano	CH ₄	% volumen	65 - 75	45 - 75	45 - 55
Dióxido de carbono	CO ₂	% volumen	25 - 35	25 - 55	25 - 30
Monóxido de carbono	CO	% volumen	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Hidrógeno	H ₂	% volumen	Trazas	0,5	0
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	mg/Nm ³	< 8000	10 - 30	< 8000
Amoníaco	NH ₃	mg/Nm ³	Trazas	0,01 - 2,50	Trazas
Nitrógeno	N ₂	% volumen	3,4	0,01 - 5,00	10 - 25
Oxígeno	O ₂	% volumen	0,5	0,01 - 2,00	1 - 5
Compuestos orgánicos	-	mg/Nm ³	< 0,1 - 5,0	Trazas	< 0,1 - 5,0

Anexo B. Variables de diseño tapas y agitador.

Tabla 1. Tipos de tapas para recipientes a presión. Fuente (León, 2001).

Tipo	Descripción	Imagen
Tapas planas	1) Se utilizan para recipientes sujetos a presión atmosférica, aunque se usan también en recipientes sujetos a presión. 2) Tapa con costo más bajo.	 <p style="text-align: center;">PLANA</p>
Tapas planas con ceja	1) Se utilizan para presiones atmosféricas. 2) Tapa de bajo costo.	

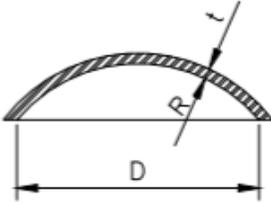
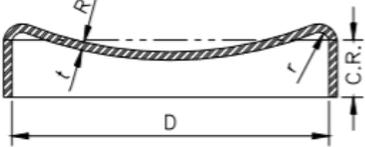
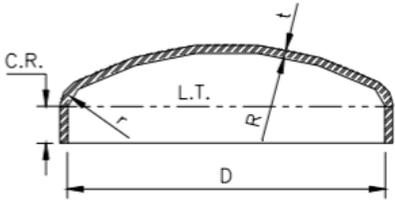
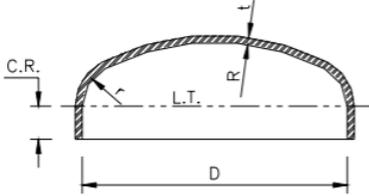
<p>Tapa únicamente abombadas</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Se emplean en recipientes a presión manométrica baja. Para soportar presiones altas, se necesitaran análisis de concentración de esfuerzos. 2) Puede considerarse de bajo costo. 	
<p>Tapas abombadas con ceja invertida</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) De uso limitado debido a su difícil fabricación. 2) Tapa de alto costo 	
<p>Tapas toriesféricas</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) De mayor aceptación en la industria, debido a su bajo costo y soportan altas presiones manométricas. 2) El radio de abombado es aproximadamente igual al diámetro. 3) Se pueden fabricar en diámetros desde 0,3 a 6 metros. 	
<p>Tapas semielípticas</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Soportan mayores presiones que las tapas toriesféricas. 2) Su silueta describe una elipse con relación 2:1. 3) Tapa de alto costo. 	

Tabla 2. Valores de “E” para espesor de tapas. Fuente (León, 2001).

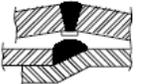
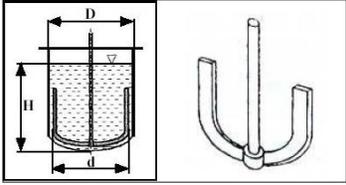
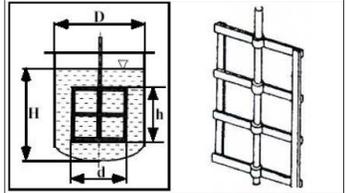
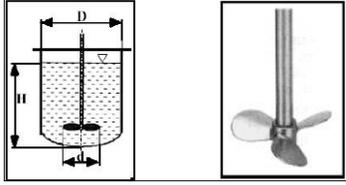
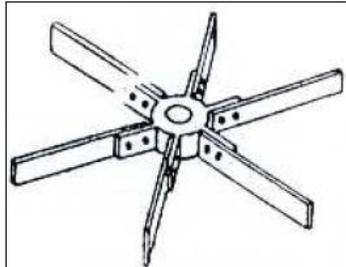
	EFICIENCIA DE SOLDADURAS VALORES DE "E"	NORMAS		
		FIGURA No. 1		
TIPOS DE UNIONES NORMA UW-12		EFICIENCIA DE LA UNION CUANDO LA JUNTA ESTA RADIOGRAFIADA		
		AL 100 %	POR PUNTOS	SIN
	SOLDADURA A TOPE UNIDA CON SOLDADURA POR AMBOS LADOS, O BIEN POR OTRO METODO CON LO CUAL SE OBTENGA LA MISMA CALIDAD DEL METAL DE APORTE EN AMBOS LADOS DE LA SUPERFICIE SOLDADA. SI SE USA LA SOLERA DE RESPALDO, DEBERA QUITARSE DESPUES DE APLICAR LA SOLDADURA Y ANTES DE RADIOGRAFIAR.	1.00	0.85	0.70
	SOLDADURA SIMPLE A TOPE CON SOLERA DE RESPALDO LA CUAL PERMANECERA EN EL INTERIOR DEL RECIPIENTE.	0.90	0.80	0.65
	UNION SIMPLE POR UN SOLO LADO SIN SOLERA DE RESPALDO	---	---	0.60
	UNION TRASLAPADA CON DOBLE FILETE	---	---	0.55
	UNION TRASLAPADA CON FILETE SENCILLO Y TAPON DE SOLDADURA	---	---	0.50
	UNION TRASLAPADA CON FILETE SENCILLO SIN TAPON DE SOLDADURA	---	---	0.45

Tabla 3. Tipos de impulsores para agitador. Fuente (Castillo, 2013; Raje, Gawande, y Khan, 2017)

Tipo de impulsor	Descripción	Imagen
De pala tipo ancla.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Se ajusta a los contornos interiores de las paredes del tanque. 2) Originan una buena transferencia de calor con las paredes. 3) Su capacidad de mezcla con respecto a otros sistemas no es óptima. 4) Su posición del rodete (d/D) varía entre 0,9 y 0,98. 	
De pala tipo paleta.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Trabaja a bajas velocidades. 2) Se utiliza para fluidos muy viscosos. 3) Conforman una estructura de malla. 	
De hélice.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Produce flujo axial. 2) Se utiliza para líquidos de baja viscosidad. 3) Se utiliza para homogeneizar, suspender fluidos y favorecer el intercambio de calor. 	
De turbina tipo hojas planas.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Produce flujo radial hacia las paredes del estanque. 2) Útil para fluidos con viscosidad menor a $0,11 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. 	

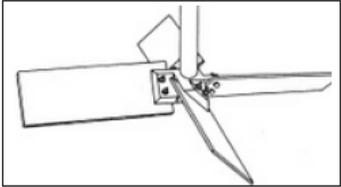
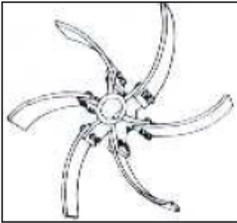
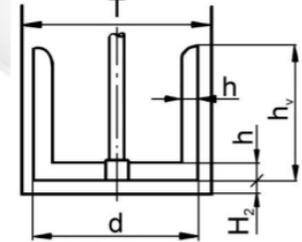
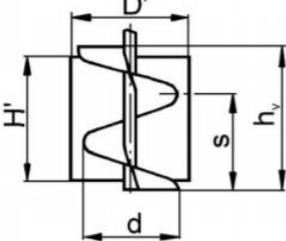
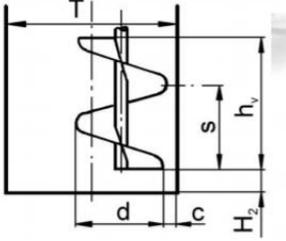
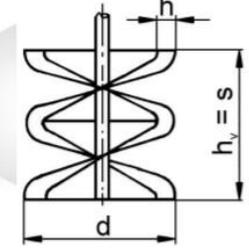
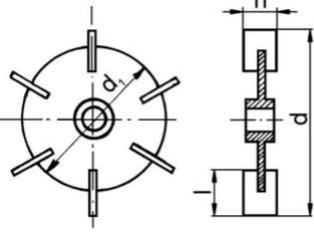
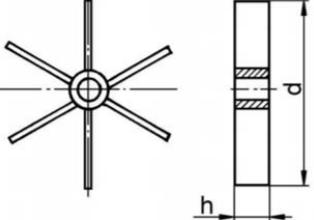
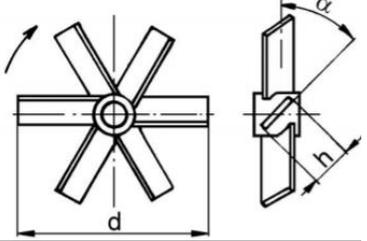
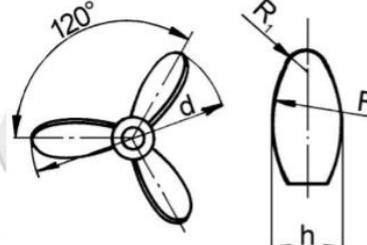
<p>De turbina tipo hojas inclinadas.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Combina flujo radial y axial. 2) Se utiliza para homogeneizar y mejorar transferencia de calor con paredes o serpentines internos. 	
<p>De turbina tipo hojas curvas.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Son útiles para dispersar materiales fibrosos. 2) Poseen un torque inicial menor que las hojas rectas. 	
<p>De turbina tipo hojas planas y disco</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Produce corrientes radiales y axiales. 2) El disco produce un efecto estabilizante. 3) Su diámetro cubre entre un 30 y un 50% del diámetro del estanque. 	
<p>Tipo helicoidal.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Usado principalmente en aplicaciones con fluidos muy viscosos. 2) Operan a poca distancia de las paredes del recipiente. 3) Produce corrientes axiales a baja velocidad. 	

Tabla 4. Correlaciones geométricas para agitadores. Fuente (Raje, Gawande y Khan, 2017).

Nombre	Correlaciones	Imagen
Tipo ancla.	1) $T/d = 1,11$ 2) $h_v/d = 0,8$ 3) $h/d = 0,12$ 4) $H_2/d = 0,05$	
Tipo helicoidal con tubo de extracción.	1) $T/d = 2$ 2) $h_v/d = 1,5$ 3) $s/d = 1$ 4) $D'/d = 1,1$ 5) $H'/D' = 1,15$	
Tipo helicoidal excéntricamente colocado.	1) $T/d = 2$ 2) $H_2/d = 0,25$ 3) $s/d = 1$ 4) $c/T = 0,02$	
Tipo cinta helicoidal.	1) $T/d = 1,05$ 2) $h_v/d = 1$ 3) $s/d = 1$ 4) $h/d = 0,1$	
Turbina Rushton	1) $h/d = 0,2$ 2) $d_1/d = 0,75$	
Tipoe turbina plana	1) $h/d = 0,2$	

<p>Tipo turbina inclinada</p>	<p>1) $h/d = 0,2$ 2) $\alpha = 45^\circ$</p>	
<p>Tipo hélice</p>	<p>1) $s/d = 1$ 2) $h/d = 0,22$ 3) $R/d = 0,4$ 4) $R_1/R = 0,16$</p>	

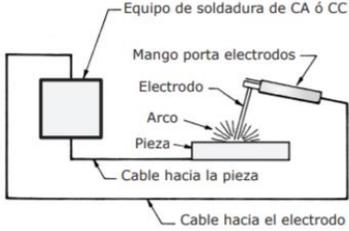
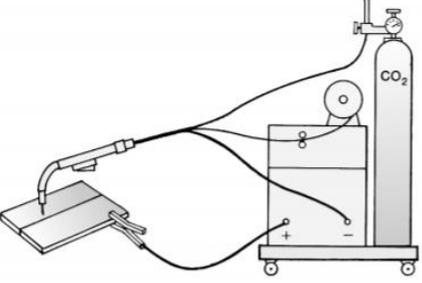
Anexo C. Selección de material tanque y tipos de soldadura.

Tabla 1. Factores para selección de material. Fuente (INDURA, 2010; PAVCO wavin, 2020; Pearson, s.f)

Material	Factores	Requisitos de proceso
Vidrio	<ol style="list-style-type: none"> 1) Resistencia a corrosión: Buena resistencia a la mayoría de ácidos menos al ácido fluorhídrico y, a altas temperaturas, al ácido fosfórico. 2) Resistencia a temperatura: Buena resistencia a la temperatura. Un vidrio común se romperá con un cambio de temperatura brusco de 55°C. Un vidrio templado lo hará con un cambio de 250°C. 3) Resistencia a presión: 4) Costo: Elevado (aproximadamente 600.000 CLP). 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Resistencia a corrosión: Alta resistencia a corrosión debido a diversidad de componentes en materia prima a utilizar. 2) Resistencia a temperatura: Material no debe presentar deformaciones o cambios en rangos hasta 60°C. 3) Resistencia a presión: Presión de trabajo de 1,52 [bar] 4) Costo: Bajo costo de fabricación. Aproximadamente 100.000 CLP.
PVC	<ol style="list-style-type: none"> 1) Resistencia a corrosión: Inmune a casi todos los tipos de corrosión. 2) Resistencia a temperatura: Resiste hasta temperaturas de 60°C. 	

	<p>3) Resistencia a presión: Buena resistencia a presión. La presión mínima de rotura es de 43,4 bar.</p> <p>4) Costo: Bajo (aproximadamente 70.000 CLP)</p>	
<p>Acero inoxidable 304 reciclado.</p>	<p>1) Resistencia a corrosión: Buena resistencia en amplia variedad de oxidación y reducción moderadas, agua fresca y aplicaciones no marinas</p> <p>2) Resistencia a temperatura: excelente resistencia a temperatura. Se recomienda usar a temperaturas por debajo de los 925°C.</p> <p>3) Resistencia a presión: Buena resistencia a la presión. Resiste hasta 33 bar de presión a 25°C.</p> <p>4) Costo: Bajo (aproximadamente 30.000 CLP)</p>	

Tabla 2. Tipos de soldaduras. Fuente. (Rodríguez, 2001).

Tipo de soldadura	Descripción	Esquema
Soldadura eléctrica	<p>Conocida como soldadura al arco, es un proceso para unir dos piezas mediante la aplicación de calor intenso. El metal en la unión de dos piezas es fundido causando una mezcla de las dos partes. Por lo general, la resistencia a la tensión y a la rotura del sector soldado es similar o mayor a la del metal base.</p>	 <p>Equipo de soldadura de CA ó CC Mango porta electrodos Electrodo Arco Pieza Cable hacia la pieza Cable hacia el electrodo</p>
Soldadura TIG	<p>También denominada soldadura por heliarco (por usarse el gas helio como protector), es un proceso por fusión, en el cual se genera calor al establecerse un arco eléctrico entre un electrodo de tungsteno no consumible y el metal de base o pieza a soldar. Utiliza helio como gas inerte para proteger la soldadura, evitando la formación de escoria.</p>	 <p>Soplete Entrada de agua Gas HELIO Salida de agua Abastecimiento de electricidad Equipo de soldadura</p>
Soldadura MIG	<p>También llamado soldadura con gas y arco metálico. Como la soldadura TIG, esta también utiliza protección por gas. Para este sistema se reemplaza el gas noble utilizado en el proceso TIG (helio o argón) por dióxido de carbono (CO₂). La principal ventaja de este sistema radica en la limpieza lograda en la soldadura, la rapidez y, en caso de trabajar</p>	 <p>CO₂</p>

	con electrodo desnudo, la ausencia total de escoria.	
--	--	--

Anexo D. Materiales para construcción de tanque.

Figura 1. Conector punta de hilo de acero inoxidable. Fuente de elaboración propia.



Figura 2. Conector tetilla material bronce. Fuente de elaboración propia.



Figura 3. Niple acero inoxidable. Fuente de elaboración propia.



Figura 4. Válvula para corriente líquida 3/8'' con terminal tetilla y niple incorporado.
Fuente de elaboración propia.



Figura 5. Válvula de acero inoxidable para corriente líquida 1/2''. Fuente de elaboración propia.



Figura 6. Válvula para corriente gaseosa 3/8'' con terminal tetilla y punta hilo acero inoxidable incorporado. Fuente de elaboración propia.



Figura 7. Caja con nombre y tipo de soldadura utilizada. Fuente de elaboración propia.



Figura 8. Electrodo tipo 3001. Fuente de elaboración propia.



Figura 9. Sensor de temperatura. Termómetro análogo. Fuente de elaboración propia.



Figura 10. Sensor de pH. Marca Milwaukee para mediciones remotas. Fuente de elaboración propia.



Figura 11. Plancha de corcho utilizada como aislante térmico. Fuente (Librería Giorgio, 2018).



Figura 12. Cinta aislante utilizada para sujetar plancha de corcho y mejorar aislación térmica. Fuente de elaboración propia.



Figura 13. Manguera de nivel. Fuente (askix.com, s.f.).



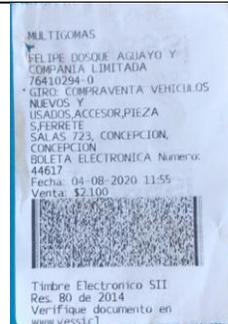
Anexo E. Boletas materiales de compra.



Acero inoxidable.



Empaquetadura.



Golillas tornillos motor.



Niple acero inoxidable.



Material para soldar.



Conectores y niples de acero inoxidable.



Pernos y tuercas.



Pernos y tuercas.



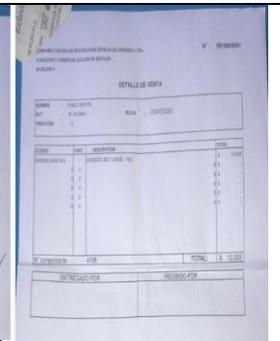
Pernos y golillas inoxidables para tapa



Sensor pH.



Serpentín de cobre recocido.



Soldadura especial acero inoxidable.



Termómetro análogo.



Válvula acero inoxidable para lodo.



Válvula para afluyente, efluente, salida de gas y conectores. Primera parte



Válvula para afluyente, efluente, salida de gas y conectores. Segunda parte.

Anexo F. cotización biorreactor escala laboratorio.

Figura 1. Cotización biorreactor escala laboratorio compañía CIENTEC.

CIENTEC INSTRUMENTOS CIENTIFICOS S.A. RUT. 96.709.796-K MIGUEL CLARO 815 PROVIDENCIA - SANTIAGO			
Equipment / Accessories			
- Service set for MIF2.1 - 3 L TV M	78011	1	
- Documentation Minifors 2 (ES)	79111	1	
- Power cord 3 m Euro plug (90 °)	70836	1	
- Black Viton tubings	-	1	
- PC Windows	-	1	
- Compresor	-	1	
Precio Total:			
NET	\$18.000.000		
IVA	\$3.420.000		
TOTAL	\$21.420.000		
* Para su funcionamiento requiere gases: Oxigeno, (dependiendo modo de cultivo) y un sistema de enfriamiento de agua o chiller, que deben ser suministrados por el cliente.			
eve Bioprocess Platform Software. OPCIONAL			
- eve Perpetual License			
- eve Standard 1st device	79131	1	
- Soft.Support & Assurance (3 years)	79159	1	
NET	\$5.600.000 + IVA		
Exit gas analysis. OPCIONAL			
- BlueInOne - CO2 0-25% / O2 1-50%	75993	1	
NET	\$7.000.000 + IVA		

Anexo H. Ecuación de Fourier y cálculo de calor perdido en serpentín.

1. Ecuación de Fourier y cálculo de calor perdido para serpentín sin aislante térmico.

$$\hat{q} = -\frac{k}{B} \cdot (T_1 - T_2) \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

\hat{q} : Flujo de calor [W/m²].

k: Conductividad térmica de la pared [W/mK].

B: Espesor de pared [m].

T₁: Temperatura interna del tanque [K].

T₂: Temperatura externa [K].

Para el cálculo se tuvieron las siguientes consideraciones:

- (a) Se consideró la temperatura del agua de calefacción igual a la temperatura interna del sistema.
- (b) Se consideró la temperatura máxima de trabajo como temperatura interna (333,15 K).
- (c) Se consideró temperatura ambiente como temperatura externa (298,15 K).
- (d) Se consideró el espesor de la pared de 3/8'' (0,0095 m).
- (e) La conductividad térmica del cobre, según Doran, (1995), es 377 [W/mK].

Reemplazando los valores de los parámetros utilizados en la ecuación (1), nos queda:

$$\hat{q} = -1.385.301,8 \text{ [W/m}^2\text{]}.$$

2. Ecuación de Fourier y cálculo de calor perdido para serpentín con aislante térmico.

En este caso se consideró la conductividad térmica tanto del serpentín de cobre como de la plancha de corcho. Para el caso de resistencias térmicas en serie, la resistencia global es igual a la suma de las resistencias individuales. De esto se tiene:

$$\hat{Q} = \frac{\Delta T}{(R_1 + R_2)} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

\hat{Q} : Velocidad de flujo de calor [W].

ΔT : Diferencia entre temperatura interna y externa [K].

R_1 : Resistencia térmica a la transmisión de calor de cobre [K/W].

R_2 : Resistencia térmica a la transmisión de calor de plancha de corcho [K/W].

R_1 se obtiene de:

$$R_1 = \frac{B_1}{k_1 \cdot A} \dots\dots\dots(3)$$

La obtención de R_2 resulta de forma análoga.

Para el cálculo se tuvieron las siguientes consideraciones:

- (a) Se consideró la temperatura del agua de calefacción igual a la temperatura interna del sistema.
- (b) Se consideró la temperatura máxima de trabajo como temperatura interna (333,15 K).
- (c) Se consideró temperatura ambiente como temperatura externa (298,15 K).
- (d) Se consideró el espesor de la pared de 3/8'' (0,0095 m).
- (e) Se consideró el espesor del material aislante de corcho de 3mm (0,003 m)
- (f) La conductividad térmica del cobre, según Doran, (1995), es 377 [W/mK].
- (g) La conductividad termica del corcho, según (Corcho24, s.f.), es 0,0385 [W/mK].

Reemplazando la ecuación (3) en (2) y añadiendo los parámetros considerados para esto, se tiene que:

$$\hat{Q} = 67,35 \text{ [W]}.$$

El flujo de calor (\hat{q}), se obtiene dividiendo la velocidad de flujo de calor por el área ocupada por el serpentín calefactor (0,15 m²), quedando:

$$\hat{q} = -449,021 \text{ [W/m}^2\text{]}.$$