UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAISO-CHILE

"DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN BIODIGESTOR ALIMENTADO CON ENERGÍA SOLAR PARA DURVILLAEA ANTARCTICA"

FLAVIO OCTAVIO NICORA SANTANA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: **ALEX FLORES MARADIAGA**

PROFESOR CORREFERENTE: **SANTIAGO GARCIA G.**

OCTUBRE-2020

Agradecimientos

Quiero agradecer en esta sección especialmente a mi familia, mi madre, mi abuela mi hermano Galiazzo, mi hermana Olimpia y mi cuñado Maximiliano, todos ellos siempre me guiaron por el camino correcto y han estado en los momentos más felices y más triste de mi breve vida.

A mis amigos de la universidad Nelson, Daniel, Fernando, Ignacio, Joaquín, Carlos, Román, Mirna, Álvaro, Jorge, Nacha, Hans, José, y Zvonimir con todos ellos compartí muchos gratos momentos que se inmortalizaran en mi memoria como grandes anécdotas.

A mis amigos del tiempo del colegio Giancarlo, Alejandro, José Manuel, Ignacio, Leonardo, Maximiliano, Francisca, María José, Juan Pablo, Camila y muchos más que han formado parte de mi vida desde hace ya 12 años, los cuales me han acompañado durante mi formación, mi crecimiento y mi desarrollo como persona, sin dejar de lado, obvio, las incontables risas y juntas nocturnas que tanto goce han dado a mi vida.

Al profesor Santiago García, que sin su indispensable ayuda hubiese sido imposible terminar esta investigación.

Dedicatoria

A mi padre Wolfgang Nicora Berndt.

Resumen

En la comuna de Algarrobo se han presentado floraciones algales nocivas durante varios años, generando una amplia serie de problemas tanto sociales como medioambientales, es por esta razón que se busca generar alguna propuesta de valor que apunte a combatir los problemas generados. Es dentro de este marco que se contempla la opción de generar biogás a partir de la biomasa presente en la rada de Algarrobo.

Debido a la escasa información que hay de esta biomasa como agente generador de biogás se inicia un proceso de pruebas del alga Durvillaea Antárctica. Los primeros estudios se realizaron en mini reactores de 237 ml.

Como siguiente paso para el escalado de los ensayos se presenta en este estudio una propuesta diseño de un equipo biodigestor de baja escala (30 litros) sumergido en un baño térmico en el cual se ubican 3 resistencias eléctricas que tienen como función mantener la temperatura de este en 35°C. Se dimensiono un sistema de energía solar fotovoltaica, compuesto por 6 paneles de 60 watts, 5 baterías de 70 ampere hora, un regulador de carga y un inversor. El sistema tiene como función satisfacer los requerimientos energéticos de las condiciones de operación del equipo biodigestor propuesto. Este modelo fue inspirado por los equipos biodigestores presentes el laboratorio de bioenergía de la UTFSM, de los cuales se mantuvieron los parámetros constructivos y operacionales, pero se escaló su volumen de 14 a 30 litros.

En base al modelo de biodigestor propuesto se realizaron simulaciones computacionales con tal de tener un primer acercamiento a la capacidad metanogénica del alga Durvillaea Antárctica.

Se realizaron tres simulaciones, en los cuales se ingresaron al biodigestor caudales de 1,3, 1 y 1,4 litros por día y se obtuvo un caudal de gas generado de 3,6, 3,75 y 5,15 litros por día de gas, respectivamente. En los 3 casos el gas generado presento un porcentaje de metano cercano al 60% con un rendimiento metanogénico de aproximadamente 200 ml de metano por gramo de solidos volátiles.

Abstract

In the commune of Algarrobo there have been harmful algal blooms for several years, generating a wide series of social and environmental problems. This study seeks to generate a value proposition that aims to combat the problems generated. It is within this framework that the option of generating biogas from the biomass present in the Algarrobo bay is contemplated.

Due to the scarce information on this biomass as a biogas generating agent, a testing process of the Durvillaea Antarctica algae begins. The first studies were carried out in 237 ml mini reactors.

As a next step for the scaling of the tests, a proposed design of a low-scale biodigester equipment (30 liters) submerged in a termal bath in which 3 electrical resistances are located whose function is to mantain the temperature of this at 35°C. A photovoltaic system was designed, consisting of 6 modules of 60 watts, 5 batteries of 70 ampere hours, a charge regulator and an inverter. The function of the system is to satisfy the energy requirements of the operating conditions of the proposed biodigester equipment. This model was inspired by the biodigester equipment present in the bioenergy laboratory of the UTFSM, of which the constructive and operational parameters were maintained, but its volumen was scaled from 14 to 30 liters.

Based on the proposed biodigestor model, computational simulations were carried out in order to have a first approach to the methanogenic capacity of the algae Durvillaea Antárctica.

Three simulations were carried out, in which flows of 1,3, 1 and 1,4 liters per day were entered into the biodigester and generated gas flows of 3,6, 3,75 and 5,15 liters per day, respectively. In all 3 cases, the gas generated presented a percentage of methane close to 60% with a methanogenic yield of approximately 200 ml of methane per gram of volatile solids.

ÍNDICE

1 Introducción XI
1.1 Objetivo general XV
1.2 Objetivos específicos XV
2 Marco teórico 1
2.1 transferencia de calor [5] 1
2.2 Tecnología de biodigestores 5
2.2.1 Biodigestor de mezcla completa 6
2.2.2 Biodigestor de flujo pistón 6
2.2.3 Biodigestor convencional (laguna cubierta) 7
2.3 Proceso de Producción de biogás 10
2.4 Simulador computacional de biodigestión ADM1 12
2.5 Energía solar fotovoltaica [6] 12
2.6 Estanques con agitadores [7] 14
2.7 Algas 16
2.7.1 Criterios de clasificación de algas 17
2.8 Floraciones algales nocivas (FAN) [10] 18
3 Estado del arte 20
3.1 Potencial metanogénico de distintas microalgas 20
3.2 Actualidad y predicciones sobre biocombustibles [12] 20
3.3 Oportunidades para el biogás producido desde macroalgas [13] 22
3.3.1 Algas marinas a biogás, digestión anaeróbica [13] 25
3.3.2 Impacto ambiental por la cosecha de macroalgas [13] 27
3.4 Biocombustible algal [14] 29
3.5 Modelos de biodigestor solar 31
3.5.1 Biodigestor calefaccionado con energía solar para producción discontinua de biogás. [15] 31
3.5.2 Biodigestor de tubular calefaccionado con energía solar [16] 33
3.6 Planta biodigestora en augusta [14] 34
3.7 Efectos del pretratamiento mecánico en producción de biogás a través de macroalgas en co-digestion con lodos orgánicos en Irlanda. [17] 36
3.7.1 Métodos y materiales 37

3.7.2 Diseño del experimento 40
3.7.3 Resultados y discusiones 40
3.7.4 Conclusiones 42
3.8 Ensayos en *Durvillaea Antárctica*, Metanización solar de algas endémicas de la región de Valparaíso para la producción de biogás combustible [18] 43
3.8.1 Riles 43
3.8.2 Ensayo de biodegradabilidad anaeróbica 44
3.8.3 Potencial metanogénico del sustrato 44
3.8.4 Resultados experimentales 47
3.8.5 Resultados BMP con frascos Serum con tratamiento previo. 53
3.8.6 Resultados cromatografía de gases 55
4 Diseño del equipo biodigestor 57
4.1 Parámetros constructivos sistema biodigestor 57
4.2 Experimentos previos 60
4.2.1 Determinación densidad del alga Durvillaea Antarctica 60
4.2.2 Determinación densidad de la mezcla 61
4.3 Cálculo de calor requerido 62
4.3.1 Supuestos y condiciones a considerar 62
4.3.2 Balance de masa en el equipo biodigestor 63
4.3.3 Balance de energía en el equipo biodigestor 65
4.3.4 Registro de temperaturas 66
4.3.5 Cálculo de radio critico de aislamiento 67
4.3.6 Cálculo de coeficiente natural de convección del aire 68
4.3.7 Cálculo de pérdidas de calor por el manto cilíndrico 73
4.3.8 Cálculo de pérdidas de calor por la tapa superior e inferior 76
4.3.9 Perdidas de calor totales por convección 83
4.3.10 Calor necesario para elevar la biomasa entrante a condiciones de operación 84
4.4 Dimensionamiento y diseño del estanque con agitador. [7] 87
4.4.1 Tipo de impulsor 87
4.4.2 Condiciones de operación deseadas 88
4.4.3 Flujos 89

4.4.4 Cálculos de dimensiones. ... 89
4.4.5 Cálculo de potencia en el agitador ... 91
4.4.6 Selección de motor ... 93
5 Dimensionamiento sistema solar fotovoltaico [20] ... 94
5.1 Energía requerida por el sistema ... 94
5.2 dimensionamiento ... 95
5.2.1 Descripción del método “amperios-hora” ... 95
5.2.2 Aplicación del método ampere-hora ... 99
5.2.3 Consumo eléctrico ... 100
5.2.4 Corriente y ángulo de inclinación ... 101
5.2.5 Dimensionado de la batería ... 101
5.2.6 Dimensionado del generador fotovoltaico ... 103
5.2.7 Especificaciones generador fotovoltaico ... 104
5.2.8 Regulador de carga ... 105
5.2.8.1 Inverso ... 105
5.3 Resumen componentes sistema fotovoltaico ... 106
6 Simulaciones computacionales en adm1 ... 107
6.1 Simulaciones ... 107
6.2 Resultados ... 108
6.2.1 Simulación 1 ... 108
6.2.2 Simulación 2 ... 111
6.2.3 Simulación 3 ... 114
6.3 Resumen de resultados ... 116
7 Conclusiones y análisis de resultados ... 117
8 Trabajos futuros ... 119
9 Referencias ... 120

Tabla 2-1: Comparación en tecnología de biodigestores (Fuente: elaboración propia)..... 9
Tabla 3-1: potencial metanogénico distintas especies de microalgas (Fuente:[11]) 20
Tabla 3-2: riesgos e impactos socio ambientales asociados a biocombustibles terrestres y combustibles macroalgales (Fuente: [13]) 24
Tabla 3-3: composición de algunas especies de algas (Fuente: [17]) 39
Tabla 3-4: Resultados preliminares de rendimiento de biogás para muestras con y sin tratamiento (Fuente:[17])..... 40
Tabla 3-5: Cantidad de biogás generado variando parámetros (Fuente: [17])..... 41
Tabla 3-6: Caracterización inicial de cada biomasa (Fuente: [18]) 47
Tabla 3-7:Nutrientes en cada biomasa (Fuente: [18]) 47
Tabla 3-8: Volúmenes de biomasa y nutrientes en las botellas de 250 ml. Ensayo BMP botella invertida (Fuente: [18])..... 48
Tabla 3-9: Medición de los parámetros de entrada en mezclas botellas 500 ml, ensayo BMP botella invertida (Fuente: [18])..... 48
Tabla 3-10: Volumen de metano generado en ensayo BMP botella invertida (Fuente: [18]) 49
Tabla 3-11: Mediciones de los parámetros de salida, concluido el ensayo BMP botella invertida (Fuente, [18]) 49
Tabla 3-12: Resultados de biodegradabilidad anaerobia ensayo BMP botella invertida (Fuente, [18])..... 50
Tabla 3-13: Volúmenes de biomasa y nutrientes en las botellas ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente, [18])..... 50
Tabla 3-14: Medición de los parámetros de entrada en mezclas botellas ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: [18]) 51
Tabla 3-15: Valor de volumen de biogás generados durante el ensayo BMP sin tratamiento previo (Fuente: [18]) 52
Tabla 3-16: Mediciones de los parámetros de salida, concluido el ensayo de BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: [18]) 52
Tabla 3-17: Resultados de biodegradabilidad anaerobia ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento (Fuente: [18])..... 53
Tabla 3-18: Volúmenes de biomasa y nutrientes en las botellas ensayo BMP frasco Serum con tratamiento previo (Fuente: [18])..... 53
Tabla 3-19: Medición de los parámetros de entrada en mezclas botellas ensayo BMP frasco Serum con tratamiento previo (Fuente: [18]) 54
Tabla 3-20: Valor de volumen de biogás generados durante el ensayo BMP con tratamiento previo (Fuente: [18]) 54
Tabla 3-21: Mediciones de los parámetros de salida, concluido el ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: [18]) 55
Tabla 3-22: Resultados de biodegradabilidad anaerobia ensayo BMP frasco Serum con tratamiento previo (Fuente: [18]) 55

Tabla 3-23: Resultados análisis cromatografía de biogás, muestras sin tratamiento previo (Fuente:[18]) 55
Tabla 3-24: Resultados análisis cromatografía de biogás, muestras con tratamiento previo (Fuente: [18]) 56
Tabla 3-25: Volumen de metano generado al finalizar el ensayo BMP con frascos Serum (Fuente: [18]) 56
Tabla 4-1: medidas principales estanques (Fuente: elaboración propia) 60
Tabla 4-2: Medición densidad alga Durvillaea Antárctica (Fuente: elaboración propia) 60
Tabla 4-3: Conductividad térmica de los materiales involucrados en los cálculos de transferencia de calor (Fuente: elaboración propia) 63
Tabla 4-4: Registro de temperaturas en la comuna de Quilpué (Fuente: www.meteored.cl) 67
Tabla 4-5: Temperatura promedio de superficie del manto cilíndrico (Fuente: elaboración propia) 75
Tabla 4-6:Temperatura promedio de superficie de la tapa superior (Fuente: elaboración propia) 79
Tabla 4-7: Temperatura promedio de superficie sección inferior (Fuente: elaboración propia) 83
Tabla 4-8: Perdidas de calor por todas las superficies del equipo biodigestor (Fuente: elaboración propia) 83
Tabla 4-9: Calor especifico y densidad de los componentes de la biomasa entrante (Fuente: elaboración propia) 85
Tabla 4-10: condiciones de operación para las simulaciones computacionales de biodigestión (Fuente: elaboración propia) 85
Tabla 4-11: Calor requerido para elevar la temperatura de biomasa entrante a condiciones de operación en simulación 1 (Fuente: elaboración propia) 86
Tabla 4-12: Calor requerido para elevar la temperatura de biomasa entrante a condiciones de operación en simulación 2 (Fuente: elaboración propia) 86
Tabla 4-13:Calor requerido para elevar la temperatura de biomasa entrante a condiciones de operación en simulación 3 (Fuente: elaboración propia) 87
Tabla 4-14: Datos de entrada para el diseño de un agitador de fluidos (Fuente: elaboración propia) 89
Tabla 5-1:Calor que deben entregar las resistencias eléctricas a la camisa térmica del sistema biodigestor (Fuente: Elaboración propia) 94
Tabla 5-2: tablas de consumo eléctrico (Fuente, elaboración propia) 100
Tabla 5-3: Corriente y ángulo de inclinación (Fuente: elaboración propia) 101
Tabla 5-4: Información de las baterías (Fuente: elaboración propia) 101
Tabla 5-5: dimensionamiento de baterías (Fuente: elaboración propia) 101
Tabla 5-6: Información del módulo fotovoltaico (Fuente: elaboración propia) 103
Tabla 5-7: dimensionamientos generadores fotovoltaicos (Fuente: elaboración propia) 103
Tabla 5-8: Especificaciones generador fotovoltaico (Fuente: elaboración propia) 104
Tabla 5-9: información regulador de carga (Fuente: elaboración propia) 105

Tabla 5-10: regulador de carga (Fuente: elaboración propia) 105
Tabla 5-11: Requerimientos del inversor (Fuente: elaboración propia) 105
Tabla 5-12: especificaciones Inversor (Fuente: elaboración propia)..... 106
Tabla 6-1: parámetros de entrada para simulaciones de biodigestión (Fuente: elaboración propia) 108
Tabla 6-2: Resumen resultados simulaciones de biodigestión (Fuente: elaboración propia) 116

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente se enfrenta a nivel mundial una gran crisis tanto energética como ambiental, la cual radica en la alta dependencia de la sociedad de las energías no renovables provenientes de combustibles fósiles, entre ellos el carbón, petróleo y sus derivados. El problema de este tipo de combustibles es que son un recurso el cual su periodo de regeneración es más lento que su periodo de extracción o uso, junto a esto, este tipo de energía es altamente contaminante por lo cual aporta en gran medida a la crisis ambiental mundial que se vive actualmente, aumentando la presencia de dióxido de carbono en el ambiente, principal causante del efecto invernadero.

Es bajo este marco que urge encontrar nuevas formas de producción de energía, las cuales sean inocuas o poco contaminante al medio ambiente. Es por esto que a lo largo de los años se ha explorado e investigado en nuevas tecnologías las cuales reutilicen subproductos de variados procesos o las cuales sean capaces de extraer la energía presente en la tierra sin producir efectos ambientales negativos en su proceso de extracción. Entre este tipo de energías encontramos la energía eólica, fotovoltaica, mareomotriz, undimotriz, bioenergía entre muchas otras.

La bioenergía consiste en la transformación química de biomasa en biocombustibles como, por ejemplo, biodiesel, bioetanol, E5, E10, E85 entre muchos otros tipos más. La producción de bioetanol se da gracias a la fermentación de azucares contenidos en materia orgánica de las plantas. El bioetanol tiene los mismos usos que los combustibles que se queman para obtener otro tipo de energía, ya sea motriz o eléctrica, es decir puede ser utilizado para transporte, generación eléctrica o generación de calor.

Existen fenómenos naturales que entregan una gran cantidad de materia prima para la generación de bioenergía, uno de estos fenómenos son las floraciones algales nocivas, las cuales consisten en una rápida proliferación de ciertas especies de microalgas o macroalgas. En ciertos casos, en los cuales se encuentran concentraciones del orden de miles o millones de células por milímetro cubico, estas floraciones son capaces de dar un tinte característico al agua, el más conocido de ellos, la marea roja. Este fenómeno

se genera por una excesiva cantidad de nutrientes junto a un aumento de la cantidad de rayos solares asociados a la estación y al aumento de temperaturas, condiciones las cuales son óptimas para la reproducción de las algas marinas.

En la localidad de Algarrobo durante la época de verano se han producido florecimientos algales nocivos durante los últimos 16 años [1], debido a este fenómeno en las costas de Algarrobo se depositan grandes cantidades de estas algas, las cuales se descomponen y forman un material mucilaginoso en la playa, emitiendo malos olores e impidiendo el tránsito por estas, por lo cual la actividad turística se ve ampliamente afectada para esta localidad [2]. Junto a lo anterior, la remoción de estas algas significa un gran problema debido a que esta actividad implica un gasto económico para la comuna el cual fue de 30.000.000 CLP en el año 2011 y para el cual el año 2019 se invirtieron 52.000.000 CLP [1], sin obtener ni un beneficio en base a esta.

Con tal de determinar si este fenómeno se produce debido a un exceso de material orgánico en la costa, se realizó un estudio para determinar la cantidad de cada especie de alga en la rada de Algarrobo, ya que estos conteos son un buen indicador para determinar la calidad del agua. El estudio se llevó a cabo sobre algas bentónicas, es decir que crecen sujetas a un sustrato, también conocidas como macroalgas, existe una amplia variedad de formas de estas. Algunas son pequeñas casi imperceptibles mientras que otras pueden llegar a alcanzar altas longitudes. Suelen vivir pegadas a rocas o al sustrato del lecho marino, estas no se alimentan directamente del sustrato, si no del agua que las rodea, por lo cual se pueden fijar a casi cualquier superficie, desde una roca hasta a un ser vivo. Se alimentan a través del proceso de fotosíntesis, captando luz solar y extrayendo los nutrientes y el dióxido de carbono del medio que las rodea mediante todo su cuerpo. Tienen dos formas de reproducción, la forma asexual donde las algas producen unas semillas llamadas “esporas”, estas son liberadas al agua y transportadas por corrientes hasta un sustrato donde se fijan. Para la reproducción sexual existen plantas masculinas y femeninas, ambas producen gametos, los cuales se unen y forman una nueva alga la cual busca un sustrato donde desarrollarse.

A partir de dicho estudio se concluyó lo siguiente: [2]

- La rada de Algarrobo presenta alta abundancia y biomasa de varios grupos de algas.
- Alta concentración y uniformidad de especies de algas indicadores de contaminación orgánica.
- Alta concentración y biomasa de especies de algas invasoras
- Baja riqueza especifica de invertebrados de fondos duros.
- Alta abundancia de invertebrados de fondos blandos
- Periodos de muy baja transparencia
- La rada de Algarrobo muestra evidencias de presentar altas concentraciones de contaminantes orgánicos.

La causa directa de este fenómeno aún no está totalmente clara, pero se consideran las siguientes causas

- Alta cantidad de materia orgánica proveniente de vertederos de agua residual con materia fecal ubicados en el sector norte de algarrobo [3], [4]
- Construcción de un molo entre el territorio continental y el islote pájaros Niño (1977) alterando la circulación natural de las corrientes marinas [3]
- La sobreexplotación del fondo marino, generando más espacio disponible para su crecimiento dejado por otras especies de algas [4]
- Aumento de temperatura asociado a la corriente del niño [4]

Este documento en particular estudiara el diseño de un equipo biodigestor y la simulación computacional de la operación de este para algas encontradas en cuantiosos números debido a un caso de floración algal nociva en las costas de la comuna de Algarrobo [2], en donde esto actualmente significa un problema para la comunidad ya que esta gran biomasa de macroalgas vara en la costa, afectando de diversos modos a la comunidad, desde el punto de vista económico se ven afectados tanto pescadores como empresarios que viven del turismo, debido al exceso de malos olores provenientes del proceso de descomposición de las algas, y del exceso de ellas en la

rada costera donde los pescadores obtienen sus productos, un desincentivo turístico para la comuna completa y gastos municipales en la remoción, en donde se extraen diariamente varios camiones llenos de estas [2] y los cuales posteriormente deben ser tratadas.

Con tal de realizar las pruebas para determinar el potencial metanogénico del alga Durvillaea Antarctica fue necesario diseñar un modelo de un equipo biodigestor el cual iba a ser manufacturado para luego quedar como un banco de prueba para futuros trabajos en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Técnica Federico Santa María, sede José Miguel Carrera. Debido a las condiciones dadas por la pandemia del COVID-19, no fue posible realizar la construcción para este ensayo, ya que las maestranzas no se encuentran en funcionamiento durante el periodo de elaboración de este trabajo. Debido a lo anterior se recurrió a realizar simulaciones computacionales utilizando los parámetros detallados en el siguiente trabajo.

En este trabajo se comentará y presentará el actual estado del arte de la biodigestión anaeróbica en algas, las técnicas utilizadas para estos procesos junto con algunas experiencias llevadas a cabo. Luego, utilizando la información presentada, se introducirá un prototipo de biodigestor sumergido en un baño térmico y acoplado a un motor eléctrico para agitación de mezcla. Se realizarán cálculos de balance de energía con tal de cuantificar las pérdidas de calor del equipo por convección y por ingreso de biomasa a temperatura menor a la de operación. Teniendo cuantificados los valores de los requerimientos térmicos se procederá a dimensionar un equipo solar fotovoltaico, el cual sea capaz de asegurar las condiciones de operación del equipo en las condiciones climáticas más desfavorables. Finalmente se presentan simulaciones computacionales en el equipo propuesto para la macroalga Durvillaea Antárctica.

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Presentar un diseño de un biodigestor alimentado a través de un sistema solar fotovoltaico y determinar el potencial metanogénico del alga endémica chilena Durvillaea Antárctica a través de simulaciones computacionales.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir los parámetros constructivos de un equipo biodigestor con capacidad de 30 litros.
- Realizar un balance de calor en el equipo biodigestor con tal de poder estimar el consumo energético de este.
- Dimensionar un sistema solar fotovoltaico que sea capaz de garantizar los requerimientos energéticos del equipo.
- Presentar simulaciones computacionales sobre la base del diseño propuesto para el alga Durvillaea Antárctica.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR [5]

Los equipos de transferencia de calor están diseñados tomando en cuenta el análisis de la transferencia de calor. Los problemas de esta ciencia que se encuentran en la práctica se pueden considerar en dos grupos: capacidad nominal y dimensionamiento. Los problemas de capacidad nominal tratan de la determinación de la razón de la transferencia de calor para un sistema existente a una diferencia especifica de temperatura. Los problemas de dimensionamiento tratan con la determinación del tamaño de un sistema con el fin de transferir calor a una razón determinada para una diferencia especifica de temperatura. En breves palabras se puede definir el calor como la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro resultado de la diferencia de temperatura.

El calor se puede transferir de tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja. Para este trabajo, debido a las condiciones indicadas durante el desarrollo de este, es de particular interés la transferencia de calor por convección.

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gases adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Se dice que es convección natural si el movimiento del fluido es causado por

las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido.

La rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton de enfriamiento como:

$$\dot{Q}_{conv} = h * A_s * (T_s - T_\infty) \ [W] \quad (2.1)$$

Donde:

- h: coeficiente de transferencia de convección
- A_s: área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección.
- T_s: Temperatura de la superficie.
- T_∞: Temperatura del fluido suficientemente alejado de la superficie.

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de este y la velocidad masiva del mismo.

Aun cuando comprendemos bien el mecanismo de la convección natural, las complejidades del movimiento del fluido hacen que sea muy difícil obtener relaciones analíticas sencillas para la transferencia de calor mediante la resolución de las ecuaciones que rigen el movimiento y la energía. Existen algunas soluciones analíticas para la convección natural, pero carecen de generalidad, ya que se obtienen para configuraciones geométricas simples con algunas hipótesis simplificadoras.

La correlación empírica sencilla para el numero promedio de Nusselt en la convección natural es:

$$Nu = \frac{h * L_c}{k} \quad (2.2)$$

Donde:

- h: coeficiente de convección del fluido
- L_c: longitud característica de la geometría
- k: conductividad térmica del fluido

El número de Nusselt también puede ser expresado a través de números adimensionales del siguiente modo:

$$Nu = C(Gr_L * P_r)^n = C * Ra_L^n \quad (2.3)$$

Donde:

- C: valor que depende de la configuración geométrica de la superficie
- n: valor que depende de la configuración geométrica de la superficie
- Gr_L: número de Grashof
- Pr: número de Prandtl
- Ra_L: número de Rayleigh

El número de Grashof, el cual también es adimensional, representa la razón entre la fuerza de empuje y la fuerza viscosa que actúan sobre el fluido, rige el régimen de flujo en la convección natural.

El cual se expresa:

$$Gr_L = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{\nu^2} \quad (2.4)$$

Donde:

- g: aceleración gravitacional
- β: coeficiente de expansión volumétrica
- T_s: temperatura de la superficie
- T_∞: temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie

- L_c: longitud característica de la configuración geométrica
- ν: viscosidad cinemática del fluido

El número de Prandtl es la mejor manera de describir el espesor relativo de las capas límite de velocidad y térmica. Representa la razón entre la difusividad molecular de la cantidad de movimiento y la difusividad molecular del calor.

$$Pr = \frac{\mu * c_p}{k} \quad (2.5)$$

Donde:

- C_p: calor especifico del fluido a presión constante
- μ : viscosidad del fluido
- k: conductividad térmica del fluido

El número de Rayleigh es un numero adimensional asociado a la transferencia de calor en el interior del fluido. Cuando este está por debajo de cierto valor crítico, la transferencia de calor se produce principalmente por conducción, cuando está por encima del valor crítico la transferencia de calor se produce principalmente por convección. Este se define como la multiplicación de los números de Grashof y Prandtl.

$$Ra_L = Gr_L * \mathrm{Pr} \quad (2.6)$$

2.2 TECNOLOGÍA DE BIODIGESTORES

Los biodigestores son una tecnología que permite transformar los residuos orgánicos en un combustible como el biogás y un fertilizante como el digestato. Los residuos orgánicos pueden ser de todo tipo, como estiércoles de animales, purines, basura orgánica de mercados, mataderos, aguas servidas domiciliarias, residuos de cocina y procesos de transformación alimentaria (suero de leche, industria vitivinícola, cervecera, etc.). A lo largo del trabajo se le denominará biomasa al residuo orgánico que hace ingreso al biodigestor previo o no su pretratamiento.

El biogás es un gas combustible que tiene entre un 50 % y un 80 % de metano (CH4) y entre un 30 % y 40 % de dióxido de carbono (CO2), ácido sulfhídrico (H2S) y otros elementos traza. De éstos, solo el metano es combustible. El metano producido en el biodigestor es similar al que se distribuye hoy como gas natural y es similar al propano o butano de los cilindros de gas. El digestato se produce tras el paso de sustratos por un biodigestor, tiene una parte líquida y otra sólida que conserva todos los nutrientes de los residuos orgánicos originales (del estiércol, por ejemplo), pero cambia en su forma química pasando de orgánica a mineral. Esto hace que los nutrientes del digestato, una vez aplicados al suelo, puedan ser directamente asimilables por plantas. Además, el digestato lleva consigo fitohormonas (vitaminas) y microorganismos que complementan su aporte a las propiedades físicas y químicas del suelo.

Existen diferentes tecnologías de biodigestores, con aspiraciones a ser más pequeños y en general más eficientes para degradar sustratos. Se pueden encontrar diversos tipos de diseño y conceptos de plantas de biogás o biodigestores, que son implementadas según el contenido de humedad con el que operen (fermentación en seco o húmedo), su número de fases (de una o dos fases), según el rango de temperatura en el que opera (psicrofílico, mesofílico o termofílico), su capacidad de aceptar carga orgánica (alta o baja) o bien según su mecanismo o ausencia de agitación (mezcla completa, flujo pistón o convencional). Todas estas características pueden estar combinadas. Puede existir, por ejemplo, un biodigestor húmedo, de dos fases, mesofílico de mezcla completa.

2.2.1 Biodigestor de mezcla completa

Los biodigestores de mezcla completa son de tecnología conocida y altamente utilizada en países como Alemania. Usualmente son tanques verticales construidos en acero o concreto con doble cubierta para acumular el biogás. Se denominan de mezcla completa, pues tienen como componente esencial la agitación interna de los líquidos del biodigestor. Esta agitación se genera de diferentes formas, desde recirculación de biogás, recirculación de digestato o con agitadores de paletas horizontales o verticales. Su principio de funcionamiento se basa en el proceso de agitación, que obliga el contacto del sustrato con los microorganismos, lo que aumenta el proceso de degradación. Esto evita que se formen sedimentos o sólidos flotantes, por lo que también evita la necesidad de separar sólidos antes del biodigestor. Su operación típica es en un rango de temperatura mesofílica por lo que se debe agregar calor externo. Para efectos del tamaño del biodigestor, la variable "tiempo de retención hidráulico (TRH)" es usualmente alta (de 20 hasta 40 días), con una carga orgánica volumétrica de alimentación (COVA) de 1 a 4 kg SV/m^3 día. Algo importante es que este tipo de biodigestores operan con mezclas de sustrato y agua que contenga entre 2% a 12% de sólidos totales. Su diseño permite la co-fermentación, o sea el agregar otros residuos orgánicos aprovechables como residuos agrícolas para aumentar la producción de biogás.

2.2.2 Biodigestor de flujo pistón

El biodigestor de flujo pistón se construye en tanques horizontales en concreto con cubiertas dobles o sencillas de geomembrana para acumular el biogás, o bien en acero. Se denominan de flujo pistón, pues el sustrato que ingresa es empujado en forma de pistón o tapón por el sustrato del día siguiente, por lo que también son denominados de flujo continuo. En otras palabras, el sustrato no es mezclado (a diferencia del biodigestor de mezcla completa) al interior del biodigestor, sino que se mueve a lo largo del sistema casi como paquetes que se van empujando. Esto se logra únicamente

con sustrato “espeso” o con sólidos totales superiores al 10%, por lo que este modelo no tiene problema de sedimentación o flotación en su interior y no requiere de separación de sólidos fibrosos antes de la entrada al biodigestor. Su operación típica es en un rango de temperatura mesofílica por lo que se debe agregar calor externo. Esto también ayuda a mejorar la viscosidad del sustrato para fluir fácilmente por el interior del reactor. Para efectos del tamaño del biodigestor, la variable “tiempo de retención hidráulico (TRH)” es usualmente alta (de 20 hasta 40 días, dependiendo de la temperatura), con una carga orgánica volumétrica de alimentación (COVA) alta de 2 a 6 kg SV/m^3 día. Algo importante es que este tipo de biodigestores operan con sustratos que contengan sólidos totales superiores a 10%. Su diseño no permite la co-fermentación, o sea agregar otros residuos orgánicos aprovechables (como residuos agrícolas) para aumentar la producción de biogás.

2.2.3 Biodigestor convencional (laguna cubierta)

El biodigestor convencional es tecnológicamente simple. No utiliza sistema de agitación ni calefacción. Esto hace que su principio de funcionamiento sea la sedimentación, reteniendo sólidos por largos periodos dentro del sistema. Al no promover activamente el contacto de microorganismos con el sustrato y normalmente operar a temperatura ambiente, tiende a ser un sistema de baja eficiencia. Un ejemplo, es el sistema de laguna cubierta, es decir, lagunas profundas impermeabilizadas y recubiertas de forma hermética con geomembrana de diferentes plásticos, como polietileno de alta (HDPE) y baja densidad (LPDE), además de etileno propileno dieno tipo M (EPDM) y policloruro de vinilo (PVC). Una de las complicaciones que pueden surgir de estos sistemas es el cierre de la geomembrana utilizada, éste es uno de los puntos débiles de este tipo de tecnología, y en los puntos en donde con frecuencia ocurren filtraciones de biogás una vez transcurrido ciertos periodos de tiempo. Otra opción son los biodigestores prefabricados, los cuales son lo mismo que una laguna prefabricada, pero con mayor facilidad de instalación al ser una única pieza o máximo

2. En este caso, el tanque del biodigestor es fabricado en geomembrana (PVC o polietileno) y viene sellado desde fábrica, donde ya ha pasado un control de calidad de hermeticidad, y solo resta ubicarlo en la zanja y llenarlo. Esta opción de biodigestores prefabricados está teniendo una fuerte implementación en otros países latinoamericanos de la costa del Pacífico.

En la tabla 2-1 se presenta una comparación resumida de los tipos de biodigestores nombrados.

Tabla 2-1: Comparación en tecnología de biodigestores (Fuente: elaboración propia)

Característica	*Convencional*	*Mezcla Completa*	*Flujo pistón*
Tanque de Fermentación	Laguna profunda, recubierta con geomembrana, biodigestor prefabricado o biodigestor tubular	Tanque vertical en concreto o acero. Instalado enterrado/ encima del suelo	Tanque horizontal en concreto instalado enterrado en el suelo
Nivel tecnológico	Bajo	Alto	Medio
Calor adicional	No	Si	Si
Solidos totales de la mezcla	0,5-3%	3-10%	>11%
TRH	40-100 días	25	25
VCO	0,1 a 1 [kg SV/m^3*d]	1 a 4 [kg SV/m^3*d]	2 a 6 [kg SV/m^3*d]
Clima ideal	Clima caliente a templado, entre 15-25 °C	Cualquier clima (tienen calefacción adicional	Cualquier clima (calefacción adicional)
Ventajas	Sistema de bajo coto con facilidades de instalación y operación	Sistema compacto de alta eficiencia, para manejar sustratos solidos	sistema compacto de alta eficiencia, para manejar sustratos solidos
Desventajas	Aplicable únicamente a climas calientes y tiende a requerir grandes tamaños	Altos costos de implementación y requerimiento de capacitación técnica para operación y mantenimiento	Costos de implementación: medio y monitoreo de formación de fibra flotante necesaria

2.3 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

La producción de bioenergía a partir de algas marinas, dependiendo el combustible que se desee, se debe someter a uno o más de los siguientes tratamientos de transformación.

- Conversión biomecánica
    - Digestión anaeróbica para obtención de metano e hidrogeno
    - Biofotólisis para obtención de hidrogeno
    - Fermentación para obtención de bioetanol, acetona y butanol
- Conversión termoquímica
    - Gasificación para obtención de hidrogeno y gas de síntesis
    - Licuefacción para obtención de bioaceite y bioetanol
    - Pirolisis para obtención de bioaceite, carbón vegetal y gas de síntesis
- Transesterificación para obtención de biodiesel
- Combustión directa para obtención de bioenergía

En la ilustración 2-1 se presentan los métodos convencionales para obtención de biocombustibles.

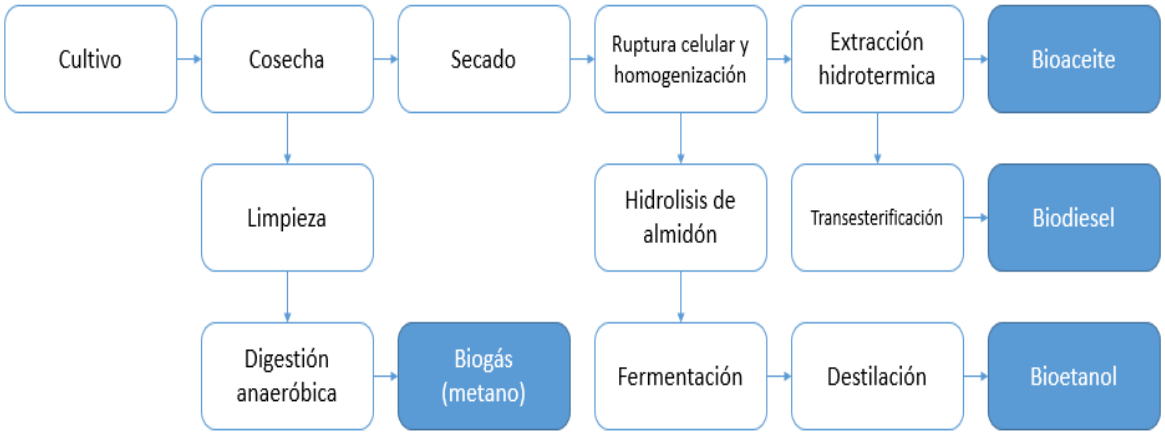


Ilustración 2-1: diagrama de procesos para la obtención de biocombustibles a partir de macroalgas. (Fuente: elaboración propia)

El proceso de digestion anaerobica puede ser dividido en cuatro etapas, cada una de ellas requiere un grupo caracteristico de micro-organismos.

- **Hidrólisis**: conversion de biopolimero no solubles a compuestos organicos solubles
- **Acidogénesis**: conversion de compuestos organicos solubles a acidos grasos volatiles y dioxido de carbono
- **Acetogénesis**: conversion de acidos grasos volatiles a acetato e hidrogeno
- **Metanogénesis**: conversion de acetato, dioxido de carbono e hidrogeno a gas metano.

Los pasos nombrados anteriormente se presentan resumidos la ilustración 2-2, en donde las bacterias acidogenicas excretan enzimas necesarias para la hidrolisis y convierten los solidos solubles organicos en acidos grasos volatiles y alcoholes. Luego estos son convertidos por las bacterios acetogenicas en acido acetico, hidrogeno y dioxido de carbono. Las bacterias metanogenicas usan el acido acetico, dioxido de carbono e hidrogeno para generar gas metano.

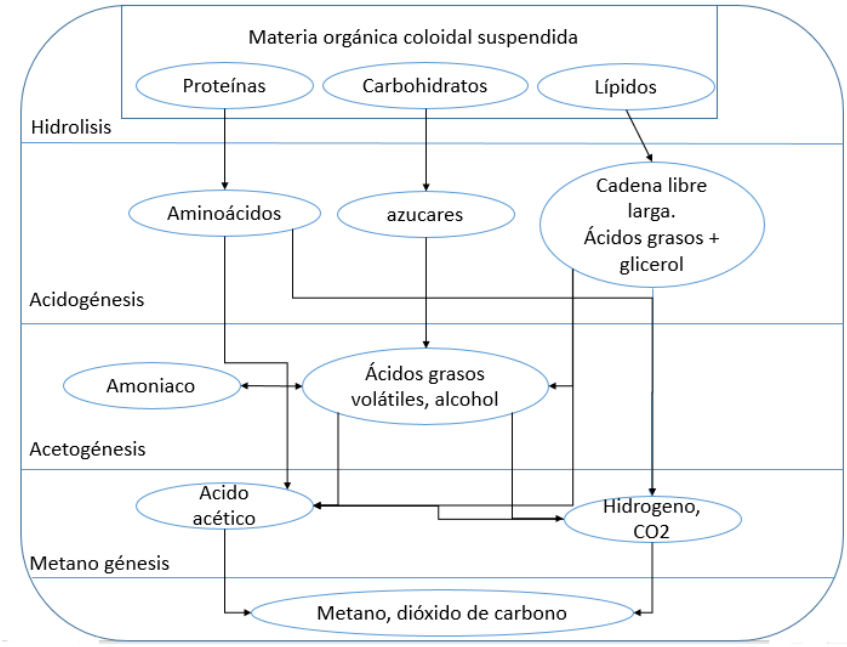


Ilustración 2-2: diagrama del proceso químico para obtención de biogás a partir de macroalgas. (Fuente: elaboración propia)

2.4 SIMULADOR COMPUTACIONAL DE BIODIGESTIÓN ADM1

El simulador "*Anaerobic digestion model 1"* (ADM1) es un modelo general que incorpora una descripción de las reacciones y procesos de transporte más importantes de la digestión anaeróbica: desintegración e hidrolisis, acidogénesis, acetogénesis y etapas metanogénicas. Compila un gran número de reacciones bioquímicas y fisicoquímicas simultaneas y secuenciales. Se asume que enzimas extracelulares catalizan reacciones bioquímicas envolviendo sustratos orgánicos biológicamente disponibles (etapa de hidrolisis). Se asume que todas las reacciones bioquímicas extracelulares siguen las bases empíricas de la ley de cinética de primer orden y todas las reacciones bioquímicas intracelulares las cinéticas de absorción de sustratos tipo Monod.

El modelo describe sustratos particulados complejos, los procesos de la digestión anaeróbica nombrados en el punto 2.3 y representados en la ilustración 2-2.

El modelo describe las dinámicas de 24 componentes, 12 solubles y 12 particulados, a través de 19 reacciones de procesos bioquímicos. Estos incluyen: 4 procesos de degradación de materia particulada, 8 para degradación de materia soluble y 7 para procesos bioquímicos de concentración. En adición, el modelo considera 6 reacciones de equilibrio acido-base y 3 reacciones de transferencia liquido-gas. Finalmente, las reacciones bioquímicas incluyen inhibición debido a pH, escasez de nitrógeno inorgánico, presencia de hidrogeno o presencia de amoniaco.

2.5 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA [6]

Se basa en la utilización de células solares o fotovoltaicas, fabricadas con materiales semiconductores cristalinos que, por efecto fotovoltaico, generan corriente eléctrica cuando sobre los mismos incide radiación solar.

Desde el punto de vista de su capacidad para conducir electricidad los materiales se clasifican en conductores, semiconductores y aislantes.

Los materiales conductores, a nivel atómico, poseen electrones de valencias los cuales están levemente ligados a su núcleo, por lo cual basta una pequeña diferencia de potencial para que estos se muevan de un átomo a otro. En el caso de los materiales aislantes es lo contrario, sus electrones de valencia están fuertemente ligados al núcleo, por lo tanto, para que estos se desplacen se requieren grandes diferencias de potencial.

En los materiales semiconductores requieren valores de diferencia de potencial medias (entre la de un conductor y un aislante) para que estos materiales puedan ceder sus electrones de valencia. Y es de este tipo de material que se construyen los módulos fotovoltaicos. La incidencia de rayos solares genera que los electrones de valencia de los módulos sean arrancados debido a la radiación solar. Este fenómeno se denomina efecto fotovoltaico.

De forma general, se pueden señalar los siguiente subsistemas componentes empleados en esta tecnología:

- Subsistema de captación: está constituido por el panel fotovoltaico, el cual tiene como función convertir la radiación solar que incide sobre él en electricidad. Está integrado por un conjunto de células fotovoltaicas que se conectan en serie o paralelo con el propósito de lograr, para una radiación dada, unos determinados niveles de tensión e intensidad eléctrica.
- Subsistema de almacenamiento: tiene como función almacenar la energía eléctrica generada que no esté siendo utilizada por el consumidor, ya que al ser la radiación solar variable no podría garantizarse, en el caso de ausencia de este subsistema, el suministro de energía en todo momento. Está compuesto por baterías conectadas en serie o en paralelo.
- Subsistema de regulación: su función es evitar que las baterías reciban más energía que la máxima que estas son capaces de almacenar y prevenir las sobrecargas que agotarían en exceso la carga de estas
- Subsistema convertidor: es el encargado de adaptar la energía producida por el panel fotovoltaico o la almacenada en las baterías, que es de tipo continuo, al tipo de energía, continua o alterna, solicitada por las cargas. En el caso que la

carga requiera requiere consumir corriente alterna, el convertir consiste en un inversor de onda, el cual transforma la tensión e intensidad continuas en tensión y corriente alternas.

2.6 ESTANQUES CON AGITADORES [7]

La agitación y la mezcla son operaciones básicas utilizadas en la ingeniería de procesos.

La agitación se refiere principalmente al movimiento que se genera en un material de una manera específica, principalmente con un equipo que genera movimiento circulatorio dentro de algún tipo de contenedor o estanque el cual puede ser cerrado o abierto. La mezcla consiste en la homogeneización al azar de dos o más materiales que en un inicio se encontraban separados.

Los agitadores se pueden clasificar en tres tipos, los cuales están relacionados con los modelos de flujos, ellos son:

- Agitadores de flujo axial: permiten un flujo que se desprende de las palas del impulsor aproximadamente a 45° y por lo tanto se presenta recirculación, creando un flujo de ida y vuelta paralelo al eje de giro.
- Agitadores de flujo radial: este tipo de agitador incluyen palas paralelas al eje del motor, los más pequeños y de aspas múltiples se denominan turbinas, los de mayor tamaño y de menos velocidad son llamados palas o paletas. Generan un flujo radial para cualquier Reynolds y proporcionan alta velocidad tangencial, aunque baja capacidad de impulsión.
- Agitadores de paso cerrado: entre estos se incluyen los de tipo ancla y helicoidal. Su principal característica es que trabajan muy cercanos a la pared del estaque y son particularmente eficaces para fluidos de alta viscosidad.

La agitación tiene variadas aplicaciones, entre ellas podemos encontrar:

- Homogeneización de un fluido

- Suspensión de un sólido en un liquido
- Emulsión de dos fluidos insolubles
- Inyección de gas en un fluido
- Intercambio térmico entre un fluido y una superficie de enfriamiento
- Fermentación
- Cristalización
- Hidrogenación

Los impulsores utilizados pueden ser diversos y varían según la aplicación para la cual se diseñe el estanque de agitación, a continuación, se explican los tres tipos de impulsores más utilizados en problemas de agitación.

- Impulsores de pala: son agitadores con forma de pala plana que giran sobre un eje vertical y cumplen eficazmente problemas sencillos de agitación. La pala puede tener un cierto grado de inclinación, pero lo más frecuente es que estas sean verticales. Giran a velocidades bajas en el centro del estanque, impulsando el fluido radial y tangencialmente, esto genera corrientes que se desplazan alejándose del centro del estanque en dirección a las paredes de este y a continuación en sentido vertical.
- Impulsores de hélice: estas generan un flujo axial, trabajan a altas velocidades y se utilizan para fluidos de baja viscosidad. Las corrientes de flujo que salen del impulsor continúan a través del líquido en una dirección determinada hasta que chocan con el fondo o las paredes del estanque. La columna de fluido que produce es altamente turbulenta, debido principalmente a las altas revoluciones a las que giran, lo cual genera remolinos de líquido que abandonan el impulsor, arrastrando el líquido estancado.
- Impulsores de turbina: se componen generalmente de numerosas palas cortas, las que giran a medias y altas velocidades sobre un eje montado centralmente en el estanque. Las placas puedes ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El impulsor puede ser abierto, semicerrado o cerrado. Son eficaces para un amplio intervalo de velocidades. En fluidos de baja viscosidad generan fuerte

corrientes las cuales se distribuyen por todo el estanque, destruyendo bolsas de gases estancados. Cerca de la zona del impulsor se genera una zona de corrientes rápidas, una elevada turbulencia y un significativo esfuerzo de corte. Las corrientes inducidas por este tipo de impulsor del tipo radial y tangencial, en donde estas inducen la formación de vórtices y remolinos, para los cuales se utilizan placas deflectoras o anillo difusor con tal de mantener la agitación más eficaz.

2.7 ALGAS

Las algas poseen distintos tipos de organismos dentro de sus amplios grupos filogenéticos, dando así origen a varias divisiones taxonómicas. En general las algas tienen un gran parecido a las plantas, son organismos fotosintéticos y acuáticos, pero a diferencia de las plantas no poseen una verdadera raíz, tallo, hojas o tejido vascular y se pueden reproducir a través de mecanismos más simples que las plantas. La gran mayoría de ellas son microscópicas, a pesar de esto también existen algas de gran tamaño. Entre sus principales características se distinguen:

- Son primariamente autótrofas
- la mayoría posee pared celular, la cual contiene carbonato silico o sílice
- viven en el agua, rocas, plantas o animales
- Existen de diversos colores, los cuales dependen de la clorofila o pigmentos accesorios los cuales permiten capturar la luz solar, según los cuales se clasifican las algas

Son organismos protistas, es decir, entre ellas podemos encontrar organismos unicelulares, multicelulares simples y multicelulares eucariotas (con núcleos celulares separados con membranas).

La mayoría de las algas son organismos eucariotas y llevan a cabo el proceso de fotosíntesis dentro de estructuras celulares con membranas denominadas cloroplastos (los cuales suelen dar el color verde a muchas de estas) los cuales contienen el ADN. La naturaleza de estas estructuras suele variar según el tipo de alga.

2.7.1 Criterios de clasificación de algas

El principal criterio de clasificación de las algas es según el pigmento predominante en su estructura, es decir, su color. Dentro de lo cual se distinguen 4 grandes grupos

- **Cianofíceas (algas verdeazuladas)**

  Son organismos procariotas fotosintéticos que poseen clorofila A, están más próximos a las otras bacterias fotosintéticas que a las algas eucariotas. Por lo que también se les denomina cianobacterias [8].

- **Rodofíceas (algas rojas)**

  El color pardo rojizo viene dado por la existencia de biliproteínas (ficoeritrina y ficocianina principalmente), que contribuyen a enmascarar el color verde de la clorofila A y B. Como material de reserva, estas células acumulan almidón y su pared celular contiene, además de fibrillas de celulosa, galactanos sulfatados como el agar y los carragenanos. Son organismos eucarióticos presentes sobre todo en el medio marino, la mayoría son pluricelulares, aunque también hay especímenes unicelulares; constituyen el grupo más diverso entre las algas bentónicas [8]

- **Feofíceas (algas pardas)**

  La coloración parda, de tonalidad muy variable, se debe a la presencia de una gran cantidad de xantófilas, entre las que destacan fucoxantina y flavoxantina; además de la clorofila A poseen clorofila C; que muchas veces son enmascaradas por la abundancia de los otros pigmentos. Son algas eucariotas, pluricelulares y morfológicamente muy diversas; se encuentran solo en agua de mar y con formas que van desde algas filamentosas de estructura sencilla, hasta

algas que tienen tejidos diversificados, por lo que se realiza transporte de nutrientes dentro de la planta. En general, este tipo de algas es de crecimiento rápido y de gran tamaño, pudiendo alcanzar hasta los 200 metros de largo. Son muy utilizadas como estabilizantes de emulsiones, como fertilizantes y para la obtención de yodo, entre otras [9].

- **Clorofíceas (algas verdes):**
  Es un grupo muy heterogéneo de algas con clorofila A y B, algunas xantofilas tales como luteína, violaxantina, neoxantina y enteroxantina. Con esta composición de pigmentos el cuerpo del alga se ve verde, lo que permite una fácil identificación en terreno. Una característica biológica importante de este grupo es el almidón que almacenan como material de reserva en sus células [8]. Morfológicamente son muy variadas, desde algas unicelulares a pluricelulares bastante complejas. Se pueden reproducir en forma alternada vegetativa, asexual o sexualmente. Son muy importantes porque constituyen el primer eslabón en la cadena alimenticia de su hábitat y contribuyen al aporte de oxígeno atmosférico. Son algas que han colonizado todos los ambientes, encontrándose el 90% de las especies en agua dulce y el 10% restante en aguas marinas; siendo en los mares fríos y templados donde se produce la mayor cantidad de especies [8]

2.8 FLORACIONES ALGALES NOCIVAS (FAN) [10]

Las algas planctónicas constituyen la base de la cadena trófica marina y su crecimiento y multiplicación celular es de gran importancia en la economía del mar ya que dicho proceso regula en forma directa o indirecta la economía del mar controlando la abundancia de los demás organismos marinos. Sin embargo, en ocasiones florecen algunas especies de algas que alteran los ecosistemas, causan mortandad de peces y contaminan los alimentos con toxinas produciendo serios problemas a la salud humana. Aunque popularmente conocidos por el nombre de “mareas rojas”, la comunidad

científica ha coincidido en denominar a estos eventos con el nombre genérico de “florecimientos algales nocivos” (FAN)

En una primera clasificación suelen distinguirse dos grupos principales de organismos causantes de FAN:

- Los que producen toxinas y por lo tanto pueden contaminar los alimentos marinos o producir mortandad de peces
- Los que no producen toxinas, pero causan otros efectos nocivos, tales como mortandad de organismos por anoxia, mortandad de peces por daño físico a sus branquias u otros órganos, producción de mucílagos que se acumulan en las playas o de otros metabolitos que afectan la calidad del ambiente. No todos los eventos causados por algas nocivas están asociados al desarrollo de grandes acumulaciones de biomasa capaces de producir un cambio de color en la superficie del mar. Muchas especies son nocivas aún en muy bajas concentraciones. También debe señalarse que algunos FAN son causados por la proliferación de microalgas bentónicas capaces de producir toxinas que pueden ser transferidas a otros organismos a través de la trama alimentaria.

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 POTENCIAL METANOGÉNICO DE DISTINTAS MICROALGAS

Los datos que se presentan en la tabla 3-1 proporcionan un resumen de la investigación que se ha realizado en varias especies diferentes de microalgas hasta la fecha y destaca el potencial metanogénico como un proceso viable para producción de biogás.

Tabla 3-1: potencial metanogénico distintas especies de microalgas (Fuente:[11])

Especie de microalga	Rendimiento de metano [ml g^{-1} VS]
Arthrospira maxima	173
Arthrospira platensis	481
Blue green algae	366
Chlamydomonas reinhardtii	587
Chlorella kessleri	335
Clorella sorokiniana	212
Chlorella vulgaris	403
Dunaliella	440
Dunaliella salina	505
Dunaliella tertiolecta	24
Durvillaea Antarctica	492
Euglena gracilis	485
Lake Chaohu natural population consortium	295
Macroystis pyrifera	545
Nannochloropsis oculata	204
Scenedesmus obliquus	287
Scenedesmus sp. y Chlorella sp.	143
Spirulina maxima	330
Zygogonium sp	344

3.2 ACTUALIDAD Y PREDICCIONES SOBRE BIOCOMBUSTIBLES [12]

En la actualidad el uso de biocombustibles a base de algas no es rentable económicamente. Pero esta situación podría cambiar durante el periodo de los años 2020-2025 cuando se implementen sistemas de combustible a base de algas. El biodiesel de algas tiene un gran potencial para desplazar los combustibles fósiles en el sector del transporte debido a la inagotabilidad de los recursos, mientras que las

reservas de petróleo están en constante disminución de forma irreversible, hasta que estos se agoten. Se estima que esto ocurrirá en unos 50 años si es que no se disminuye el uso de estos. Tan solo los países europeos consumen un cuarto del petróleo producido cada año y países con economías emergentes como China e India incrementan el volumen consumido de forma dramática.

Desde que el consumo de petróleo aumento, las autoridades europeas han incrementado las mediciones de polución y signos de cambio climático. Los cuales han ido en aumento junto al consumo de combustibles fósiles, por lo cual, las autoridades de la unión europea tienen cada vez más interés en fuentes de combustibles renovables y no contaminantes, con lo cual se espera que disminuyan las emisiones de gases de efecto invernadero producidos por el uso de combustibles fósiles.

La combinación de combustibles abre la puerta para el desarrollo de la bioenergía, ya que se obtiene una fuente de energía la cual es a la vez sustentable y benéfica para el medio ambiente. La producción de biocombustibles de tercera y cuarta generación se ve afectada de gran modo por el cultivo de la materia prima, siendo este un factor clave y altamente aprovechable ya que estas pueden ser cultivadas en una gran cantidad de ambientes. Las algas presentan un gran contenido de lípidos (sobre el 30%) los cual las posiciona como un gran recurso en el contexto de los biocombustibles líquidos que puedan reemplazar a los combustibles fósiles.

El biocombustible a base de algas ha contribuido en avances estructurales en el sector de los biocombustibles líquidos teniendo grandes aspiraciones de lograr mejores retornos y sustentabilidad económica debido a que, a medida que los combustibles fósiles disminuyan su cantidad y aumenten su valor sin tener estos la opción de regenerarse dentro de periodos de tiempo razonables, dará paso a que los biocombustibles se vuelvan más importantes debido a que son un recurso renovable el cual en un futuro será altamente rentable como reemplazo de los anteriormente nombrados. Sin embargo, actualmente aún son necesarios grandes avances para tener tecnologías que funcionen a base de biocombustible algal y posean mejores rendimientos y menores costos de producción.

3.3 OPORTUNIDADES PARA EL BIOGÁS PRODUCIDO DESDE MACROALGAS [13]

El cultivo terrestre de granos para biocombustible parece ser una contribución despreciable para aminorar la disminución de la emanación de gases de efecto invernadero y puede causar otros impactos ambientales tales como la reducción del agua dulce disponible y el cultivo de alimentos. Dadas estas limitantes ha habido un nuevo y creciente interés en la producción acuática y marina de biocombustibles. Este interés se puede dividir en dos principales componentes para biocombustibles, las macroalgas y las microalgas. Los biocombustibles derivados de las microalgas han recibido mucha atención como una fuente de biodiesel, sin embargo, los costos de producción son de un orden de magnitud muy elevado. A pesar de que actualmente hay muchas investigaciones ligadas a la producción neta de microalgas para biodiesel, los fotobiorreactores son equipos los cuales se ven improbablemente competitivos desde un punto de vista económico para la producción de bioenergía, y los tanques para producción de microalgas solo pueden ser situados en regiones en donde hay gran cantidad de horas de sol e incluso en estas condiciones pueden llegar a ser poco competitivos en el mercado de los biocombustibles.

Las macroalgas como fuente de bioenergía en primera instancia recibieron un severo escrutinio en el proyecto "*US ocean food and energy farm project* "propuesto por Wilcox, iniciado en 1973 y operativo por más de una década. Este consistió en la construcción de granjas marinas para el cultivo del alga macrocystis. A pesar de que el cultivo de esta especie en ambientes muy alejados de la costa presento muchas dificultades técnicas, la biogasificación de biomasa macroalgal dio excelentes resultados. En la tabla 3-2 se presentan las ventajas del cultivo de macroalgas frente a otras materias primas para la producción de biocombustibles.

En regiones costeras con clima templado esta tecnología podría tener un potencial significativo para suministrar la demanda energética local, particularmente en zonas donde la expansión terrestre para la producción de biocombustible está limitado debido a altos porcentajes de productividad primaria destinada al uso humano, como por

ejemplo la costa del atlántico norte de Estados Unidos o Europa o la costa oeste de Sudamérica.

Tabla 3-2: riesgos e impactos socio ambientales asociados a biocombustibles terrestres y combustibles macroalgales (Fuente: [13])

Criterio	*Riesgos e impactos asociados*
Emisiones netas de gases de efecto invernadero derivadas del cambio en el uso de la tierra	El cultivo de macroalgas como biocombustible sería totalmente basado en recursos marinos por lo cual no tendría emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el uso del suelo para su cultivo
Amenazas para la biodiversidad	Los cultivos de macroalgas toman lugar en partes donde la columna de agua está por sobre el lecho marino. Los impactos a gran escala por la producción de macroalgas a la biodiversidad bentónica actualmente no están cuantificados. Probables impactos incluirían sombreamiento y competencia por nutrientes, sin embargo, la mayoría de la producción seria en aguas donde el lecho marino es más profundo que la zona fótica, y donde los efluentes de nutrientes provenientes de la zona terrestre causen zonas sobre nutricionadas de aguas. Es probable que la biodiversidad en las zonas contiguas a las granjas de macroalgas aumente debido a la construcción de hábitats estructurales complejos.
Impacto en el precio de los alimentos	Actualmente la mayoría de los cultivos de macroalgas están dedicados para el consumo humano. A pesar de esto es poco probable que los precios de algas dedicadas al consumo humano aumenten debido a la segregación del mercado y el elevado valor de macroalgas como alimento en comparación a recurso energético.
Competición por recursos acuáticos	El cultivo en masa de macroalgas tiene cero requerimientos de agua fresca y solo un modesto consumo para el proceso de digestión anaeróbica.

3.3.1 Algas marinas a biogás, digestión anaeróbica [13]

En Europa los cultivos de macroalgas han sido exitosos mediante el sistema de largas líneas, similares al sistema de producción de mejillones. Posicionados adyacentemente a jaulas de salmones en lagos marinos escoceses, líneas horizontales de 100 metros de largo, las cuales poseen cuerdas horizontales en donde se posicionan las algas cada 50 centímetros, con rendimientos mayores a 50 Kg por metro horizontal de línea. Si esto se extrapola considerando 40 líneas de 100 metros cada una, entonces el rendimiento seria de 200 toneladas de alga húmeda por hectárea (aproximadamente 20 toneladas de alga seca). Sin embargo, si los cultivos de macroalgas quieren ser significativos en la producción de combustibles se harían necesarias áreas muy extensas de granjas de algas. MacKay (2009) deja muy en claro que la cantidad de biomasa necesaria para este fin contemplaría una actividad de la escala de un país para hacer una contribución significativa al ámbito de los combustibles en un territorio como el reino unido. Esto requiere grandes cambios en las actitudes sociales respecto al uso del ambiente marino, y en muchos países, cambios de legislaciones para hacer esto posible.

Actualmente hay mucha plataforma continental apropiada para la acuicultura masiva y su expansión, actualmente está representa tan solo el 0,04% del área de la plataforma continental. Sin embargo, para la producción de algas marinas lejos de costa en Europa, es necesario un gran desarrollo en tecnologías más mecanizadas para la siembra y cosecha que los métodos actualmente existen para la cosecha de algas a gran escala en Asia. El cultivo de algas a escala industrial en ambientes distintos a los conocidos (cercanos a la costa), bajo un régimen de nutrientes distinto (lejos de la costa) aún tiene que ser estudiado.

Las macroalgas pueden ser convertidas a biocombustibles mediante varios procesos, incluido el tratamiento térmico y la fermentación, pero el camino más directo para obtener biocombustible desde macroalgas es a través de la digestión anaeróbica a biogás (~60% metano). El metano puede ser utilizado para producir calor, electricidad o ser comprimido para su uso como combustible para transporte.

En comparación con cultivos de biomasa terrestre, las macroalgas contienen poca celulosa y nada de lignina y por consecuencia se lleva a cabo una hidrolisis más completa. El rendimiento del gas está relacionado al contenido de cenizas y al nivel de almacenamiento de azucares dentro del alga, ya que la composición bioquímica de las algas marinas varía según estación también varía la composición del biogás producido a partir de estas. La relación carbono-nitrógeno es también una parte importante de la optimización de la dieta digestiva y fortalecimiento para la co-digestion de algas marinas con otros substratos ricos en nitrógeno, por ejemplo, desperdicios de comida o lodos provenientes de la agricultura. El rendimiento del biogás también depende de una amplia gama de variables tales como sistema digestivo, inoculo, configuración y composición de la materia prima.

Quizás la estimación más realista para la producción de biogás industrial a partir de macroalgas fue realizada por Matusi (2006), utilizando un biodigestor anaeróbico comercial de 4 etapas por 150 días, con una alimentación diaria entre 0.2-1 tonelada de alga marina y un tiempo de retención entre 15 a 25 días. El resultado fue una producción media de 22 metros cúbicos de metano por tonelada de alga parda húmeda *(Laminaria sp.).* El aprovechamiento potencial de energía de la digestión anaeróbica es positivo al compararlo con cultivos terrestres sobre la base de energía producida por unidad de área cultivada.

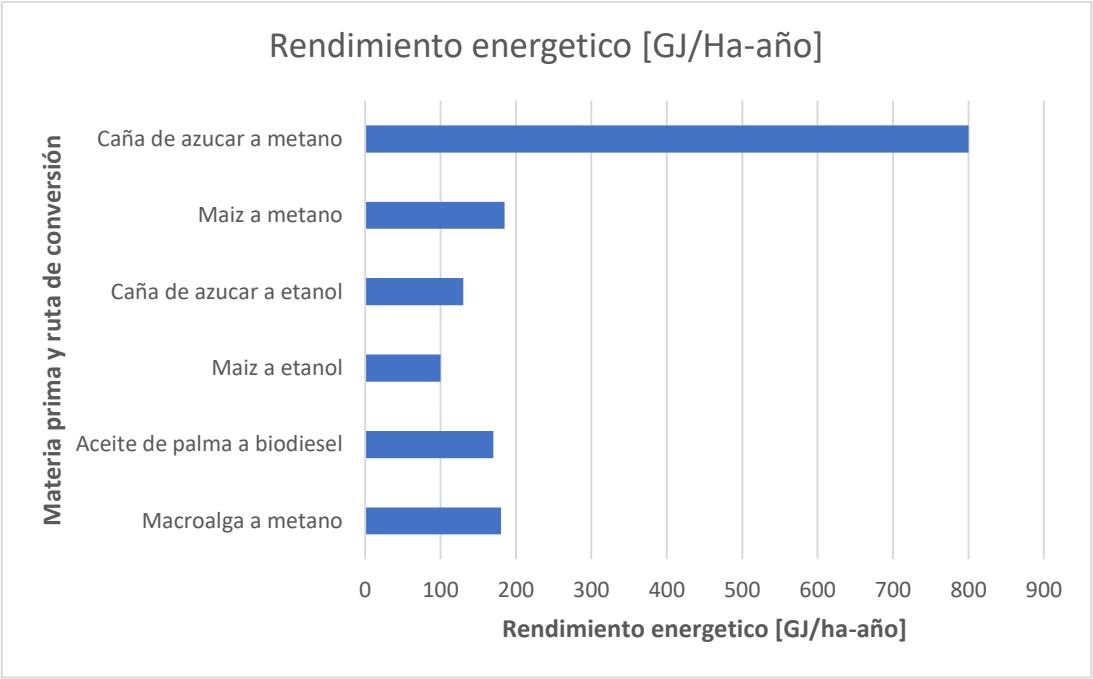


Ilustración 3-1: Grafico del potencial energético de biocombustibles basado en el cultivo de 200 toneladas de macroalgas húmeda por hectárea (Fuente: [13])

3.3.2 Impacto ambiental por la cosecha de macroalgas [13]

Los impactos medioambientales de los cultivos de algas marinas en grandes escalas pueden considerar desde cambios en las corrientes hidrodinámicas locales, formando patrones de sedimentación, impacto en las comunidades bentónicas por el incremento del suministro de materia orgánica, cambios en los nutrientes de las columnas de agua hasta sombreamiento del lecho marino (en áreas de baja profundidad). A pesar de esto, se pueden anticipar algunos efectos medioambientales positivos tales como el aumento de la interacción entre peces, cetáceos, aves y otros habitantes del ambiente marino. Dentro de otros beneficios asociados a las granjas marinas se encuentra la actuación de estas como una zona de alta biodiversidad estática, dando pie al desarrollo de actividades pesqueras con menor impacto ambiental, dentro de las proximidades del entorno formado por la granja marina. Junto a lo anterior, los cultivos al ser cosechados no se retiran en su totalidad, con lo cual al final del ciclo se continúa teniendo un ambiente que provee refugio y substratos para perpetuar vida marina local.

El digestato luego de la digestión anaeróbica puede ser tanto un valioso producto como un caro desecho. Esto dependerá de un numero de factores incluyendo la cantidad de metales en el tanto como los tipos de desechos orgánicos que hayan sido mezclados con las algas dentro del biodigestor. Estudios de la digestión anaeróbica de microalgas

sugieren que cerca de un 80% del nitrógeno de la biomasa es recuperable en forma de amoniaco o amonio en la fracción liquida, y que el nitrógeno restante en el digestato solido tiene un 40% de biodisponibilidad cuando es aplicado a los suelos. Por lo cual se hace necesario un análisis de la misma naturaleza, pero esta vez utilizando biomasa macroalgal.

A modo de resumen el efecto global del uso de macroalgas para la producción de biocombustibles es probablemente y a primera impresión positivo.

El efecto global del uso de combustible a partir de macroalgas parece ser positivo. Un análisis del ciclo de vida completo del biometano a través de cultivos lejos de la costa ha demostrado una reducción del 69% en utilización de combustibles fósiles al ser comparado con gas natural, una reducción del 54% en emisión de gases de efecto invernadero y una mejora en el índice de eutrofización marina.

3.4 BIOCOMBUSTIBLE ALGAL [14]

El cultivo terrestre de materias primas para generar bioenergía resulta ser altamente costoso y causa impactos ambientales, consumiendo la a veces limitada cantidad de agua que hay presente en ciertas zonas, es por eso que el interés en la generación de bioenergía con cultivos acuáticos ha llamado la atención durante los últimos años, ya que estas tienen un alta capacidad de fijación de gases de efecto invernadero y una alta producción de lípidos y carburantes, compuestos fundamentales al momento de producir biocombustibles líquidos de segunda generación, es decir, biodiesel y bioetanol, biogás e hidrogeno.

Junto a los pequeños impactos ambientales que genera el cultivo de estas, el crecimiento de las algas marinas es entre 10 a 100 veces más rápido que las plantas terrestres pudiendo lograr un rendimiento de aproximadamente 7,5 toneladas por hectárea, dependiendo esto del alga que se cultive. Esto se debe al exceso de recursos que disponen estos cultivos al ser cosechados en el mar, donde los factores más importantes son la cantidad de agua, la materia orgánica y la cantidad de luz solar. Se puede mejorar la tasa de crecimiento de las algas en ciertos métodos de cultivo agregando protoplastos, los cuales son células vivas de alga que no presentan una pared celular lo cual ofrece un sistema único uniforme el cual facilita muchos aspectos de la biotecnología moderna. El principal uso de protoplastos es la producción de híbridos somáticos a través de la función de protoplastos para obtener especies de algas de rápido crecimiento. El uso de protoplastos bajo condiciones controladas puede aumentar el ritmo de regeneración de algas lo cual implica una mayor producción de la planta de cultivo.

Como se puede apreciar la ilustración 2-1, tanto el bioaceite, biodiesel y bioetanol necesitan una mayor cantidad de tratamientos que el biogas, por lo cual el costo de produccion de los 3 primeros es notoriamente mas elevado que el del biogas. En el caso estudiado el proceso de cultivo de algas podria obviarse en cuanto a costos economicos respecta, ya que el corazon del problema planteado es que hay una sobreproduccion de

manera natural de algas, en donde estas cuentan con todos los factores de crecimiento ideales, sobretodo una gran cantidad de material organico depositado en la zona debido a la obstruccion artificial de corrientes naturales, las cuales se depositan en las playas aledañas asi facilitando incluso el proceso de cosecha.

Debido a las razones planteadas anteriormente, surge particular interes respecto a la produccion de biogas para el tratamiento de la floraciones algales nocivas por lo cual el punto que se tratara con especial enfasis es la digestion anaerobica, proceso fundamental para la produccion de biogas. La digestion anaerobica es un proceso biologico en el que la materia organica , en ausencia de oxigeno, y mediante la accion de un grupo de bacterias especifico según material, se descompone en productos gaseosos o biogas y en digestato, el cual es una mezcla de productos minerales(N, P,K, Ca,etc.) y en compuestos de dificil degradación. Este proceso es uno de los mas idoneos para la reduccion de gases de efecto invernadero, captando las emisiones que se dan de forma natural por la descomposición del material organico en la interperie y estas se aprovechan en forma de biocombustible

3.5 MODELOS DE BIODIGESTOR SOLAR

Durante las últimas décadas se han construido diversos prototipos de biodigestores alimentados mediante energía solar, en esta sección se mostrarán algunos de estos.

3.5.1 Biodigestor calefaccionado con energía solar para producción discontinua de biogás. [15]

Este prototipo fue estudiado el año 2006 en la zona del secano centro-oeste de Argentina, se trabajó con estiércol de cabra y se obtuvo un nivel de producción de biogás del orden de 1,20-1,75 m^3 biogás /m^3 de biodigestor dependiendo del nivel de radiación solar, para una carga diaria de 20 kg/m^3 de digestor.

En este prototipo se utilizó un tambor de 200 litros, se le ha instalo una tapa cuadrada grande para permitir la carga y descarga de la mezcla estiércol/agua con comodidad. En su interior se adicionaron 3 caños de hierros perforados que permiten regar en forma automática por efecto de la misma presión del gas, la parte superior de la masa. Posee dos válvulas, una permite la extracción de muestras y en la otra se materializa la salida de gas que se conecta a una campana que permite la acumulación de un volumen de 70 litros de capacidad y es de material plástico. Esta campana posee dos válvulas que permiten el ingreso de gas desde el biodigestor y la salida hacia la cocina. Además, dos tubos de cobre de 12,5 milímetros de diámetro en posición horizontal a distintas alturas que permiten, mediante el uso de termocuplas, registrar la temperatura interna del equipo.

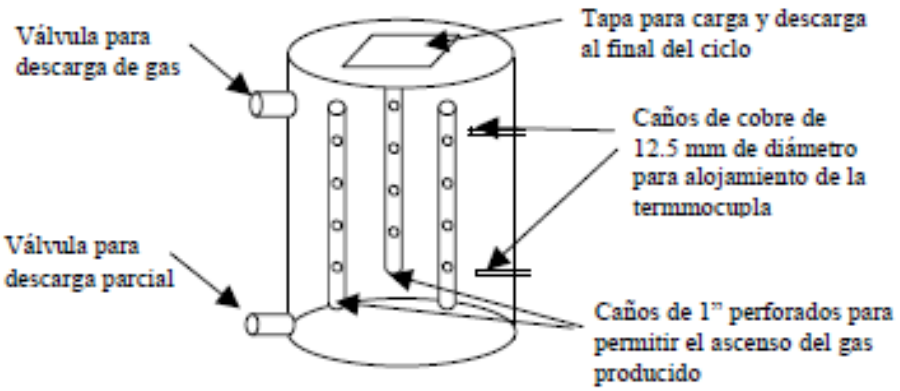


Ilustración 3-2: biodigestor solar para desechos de la actividad caprina (Fuente: [15])

El sistema de calefacción consta de dos partes:

- Mejora de las condiciones térmicas del digestor, otorgando mayor conservación de energía del digestor y permitiendo la ganancia solar directamente sobre el digestor a través de una cubierta.
- Incorporación de un invernadero: generando un ambiente térmico propicio alrededor del digestor. Este ambiente se diseña de manera que gane calor proveniente del sol durante el día y durante la noche se mejoran las condiciones de conservación de energía y además se le otorga la suficiente inercia térmica para evitar su enfriamiento excesivo.

Con tal de incrementar la ganancia solar sobre el digestor, se instaló una cubierta transparente consistente en una placa de policarbonato alveolar de 8 milímetros de espesor acompañando la curvatura del lado exterior del tambor y se colocó abarcando solo la superficie que puede ser iluminada con la radiación solar. El resto de la superficie que sería neta perdedora de energía se ha aislado con placas de poliestireno expandido de 5 centímetros de espesor, también acompañando la curvatura del tambor.

Se coloco el biodigestor dentro de un invernadero, adosado a la vivienda. Esto genera una atmosfera cálida alrededor del digestor con el objeto de mantener condiciones térmicas favorables. Además, se agregó un sistema de reflectores que aumentan la

radiación solar incidente sobre el invernadero durante el día y durante la noche se cierran, favoreciendo la conservación de energía.

3.5.2 Biodigestor de tubular calefaccionado con energía solar [16]

Al igual que el equipo nombrado en el punto anterior, este modelo se aplicó en las localidades del centro-oeste de Argentina, con biomasa de estiércol caprino. Este equipo se calefacciona de forma pasiva con energía solar, y se busca lograr el mantenimiento de las condiciones térmicas a través de aislamiento. Este está construido en polietileno de 200 micrómetros, con un volumen útil de 0,25 m^3. El prototipo diseñado para trabajar semi enterrado en zonas frías, se encuentra montado sobre una plataforma en altura para facilitar su operación e introducción de mejoras. Dispone de aislación térmica en toda su envolvente. La cubierta está constituida por un filme de polietileno traslucido de 200 micrómetros de espesor con inclinación de 144° respecto a la horizontal. La cubierta aislada móvil dispone en su cara interior de papel metalizado reflectante y EPS de 2 cm, con una inclinación de 60° respecto a la horizontal. Se indica con puntos rojos la ubicación aproximada de los sensores de temperatura en el corte transversal.

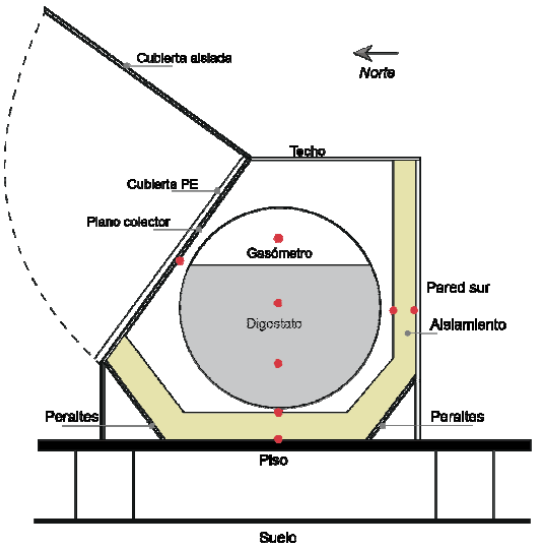


Ilustración 3-3: biodigestor tubular con calefacción solar pasiva (Fuente: [16])

3.6 PLANTA BIODIGESTORA EN AUGUSTA [14]

La biomasa es cultivada en estanques abiertos en el mar frente a la planta y los residuos biologicos son bombeados en un hidrociclón para la remocion de arenas con tal de evadir el daño en el reactor de hidrolisis y acidificacion. La fase de acidificacion (en un digestor de mezcla completamente anaerobico) se realiza a 38° C. el uso de procesos termofilicos acelera la destruccion de las macromoleculas. Despues de esta primera fase el efluente es clarificado: la parte solida es recirculada para completar la hidrolisis, mientras que la fase liquida pasara a traves de la segunda fase de metanización. Luego de esto el sistema es equipado con instrumentos para el control automatico de las operaciones mecanicas y de acidificacion.

La segunda fase de la digestion anaerobica usa rotores patentados de biomasa " rotores arquimedes" para mantener una alta concentracion de flora bacteriana metanogenica y optimizar el desprendimiento de biogas.

El uso directo de residuos biologicos es problemático debido a la heterogeneidad del compuesto y la alta carga de contenido nitrogenado. Esto causa problemas en el proceso de fermentacion, por lo cual se agregan otros tipos de biomasa (por ejemplo cultivos de cereal) u otros pretratamientos complejos son usualmente requeridos para tener una mezcla homogenea dentro del biodigestor. Se produce biogas de baja calidad, el cual requiere tratamiento adecuado, y no entrega ventajas en terminos de eutrofizacion debido a la gran cantidad de descarga de liquidos durante la fase anaerobica.

El sistema esta compuesto por un bioreactor de dos etapas para la produccion de biogas a traves de digestion anaerobica usando macroalgas marinas como materia prima y es en esta parte de la planta donde todos los procesos de descomposicion anaerobica suceden.

La mezcla de biogas, despues de ser colectada, es enviada a la planta de tratamiento de biogas donde se remueve el sulfuro de hidrogeno. Al mismo tiempo, los flujos de solidos y liquidos salientes de la digestion son llevados a una piscina inoxidable para

el proceso de clarificacion. En esta fase la fraccion solida es separada de la liquida con tal de que la fase solida pueda ser convertida en fertilizante despues del proceso de secado. La fraccion liquida se prepara para volver a ser usada en los estanques de cultivo para mejorar la tasa de crecimiento de las algas, de este modo de utilizan todos los subproductos del proceso de generacion de biogas, asi disminuyendo el impacto ambiental generado por esta actividad. A continuacion se presenta un esquema que representa el proceso productivo de la planta de generacion de biogas.

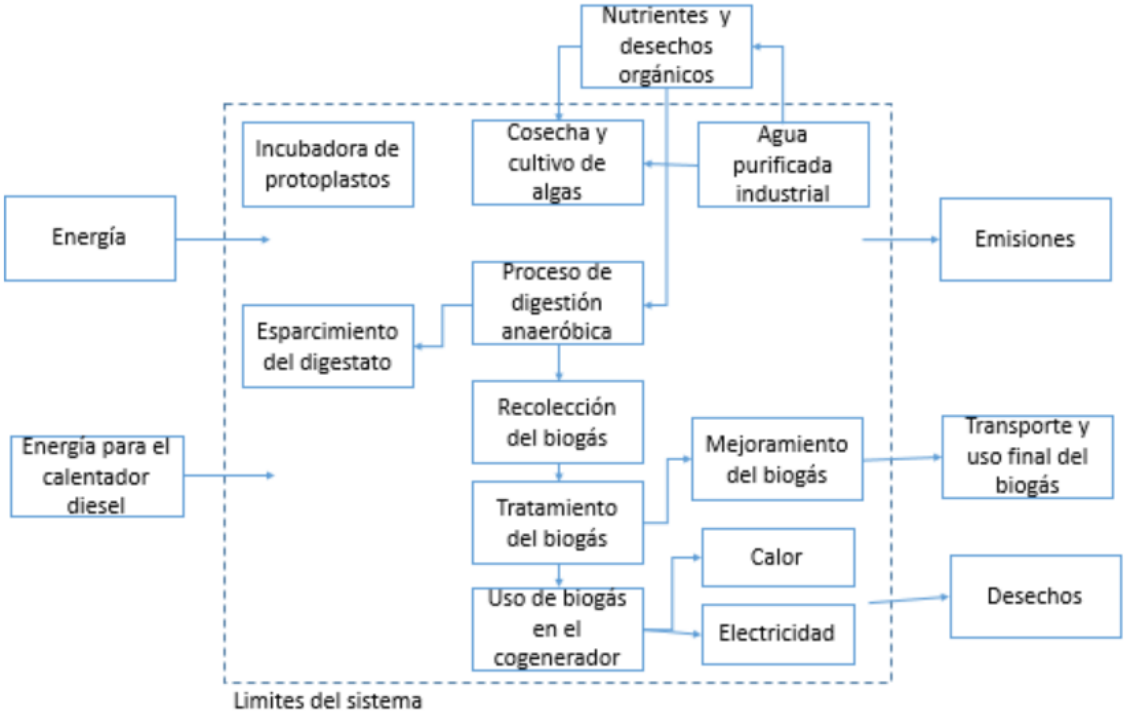


Ilustración 3-4: Esquema de la planta biodigestora en Augusta. (Fuente: [14])

3.7 EFECTOS DEL PRETRATAMIENTO MECÁNICO EN PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A TRAVÉS DE MACROALGAS EN CO-DIGESTION CON LODOS ORGÁNICOS EN IRLANDA. [17]

Las algas marinas son plantas las cuales tienen mucho en común con sus parientes terrestres, pero su composición química difiere en gran parte debido a la biomasa lignocelulósica. Además de ser carbonos neutrales como las plantas terrestres, la explotación de algas para producción de bioenergía tiene dos grandes ventajas

- La acuicultura no utiliza no utiliza tierra destinada a agricultura
- Su rango de crecimiento es en tres dimensiones, largo, alto y ancho.

Las algas también han demostrado contribuir positivamente a mayores rendimientos en el proceso de co-digestion junto a otros desechos orgánicos.

Una fase de pretratamiento es generalmente necesaria para romper la estructura cristalina de cualquier tipo de biomasa proveniente de plantas, junto con la lignina, la cual es un inhibidor del proceso de digestión produciendo que este demore más. En este aspecto las macroalgas están más capacitadas para el proceso de digestión anaeróbico con el fin de lograr fermentación de metano. De hecho, ellas no solo tienen poco contenido de lignina, también contienen altos niveles de carbohidratos, los cuales hacen de ellas una mejor materia prima para la producción de bioenergía. A pesar de que los niveles de lignina sean bajos, las macroalgas requieren un pretratamiento mecánico con tal de que se mejore y acelere el ciclo digestivo.

En la literatura se puede encontrar que se han estudiado diversos pretratamientos en diversos sustratos, en los cuales se ha logrado estimar la producción de metano. El pretratamiento físico más usado en lignocelulosas es el térmico, mientras que el procedimiento mecánico más utilizado es la molienda. El pretratamiento térmico es muy efectivo en tanto el rendimiento del biogás como en la producción de metano, sin embargo, debido a los altos requerimientos de temperatura es muy costoso de mantener, y más importante, sobre ciertos regímenes de temperatura se inhibe el fenómeno de la digestión anaeróbica. La molienda por otro lado apunta a reducir el tamaño de las

partículas y lleva a un incremento del área superficial disponible para los microorganismos, por lo cual la molienda resulta en un doble beneficio, reduce el tiempo de la digestión entre un 23% y un 59% y causa un incremento en el rendimiento del biogás cuantificable entre un 5% y un 25% en la mayoría de las lignocelulosas. Sin embargo, la molienda tiene altos requerimientos energéticos los cuales no se justifican con el actual valor de la energía.

A continuación, se pretende detallar la mejora entregada por un pretratamiento usando un *"hollander beatear"*. Este tratamiento se basa en el concepto de transformar en polvo el sustrato, al igual que todos los otros pretratamientos mecánicos, con tal de incrementar la producción de biogás. Debido a los múltiples beneficios se utilizarán lodos en el proceso de co-digestion, entregando estos las bacterias necesarias para el biodigestor. El *"hollander beater"* jamás ha sido usado como pretratamiento mecánico para biomasa algal. Teniendo en cuenta que el pretratamiento mecánico propuesto ya ha probado su eficiencia cuando es aplicado a ensilaje de maíz obteniendo hasta un 29% extra de volumen de biogás, en este estudio fue aplicado a lotes de biomasa algal.

3.7.1 Métodos y materiales

- **Características de la máquina de pretratamiento**
    - La máquina de pretratamiento consiste en un *"hollander beater"* modificado, la maquina está hecha de una pista de rodadura de agua equipada con un tambor aplanado girando a 580 RPM. El requerimiento energético es de 1 hp. Una cama con ranuras afiladas es ubicada bajo la rueda rotatoria con funcionamiento dual, para cortar el material y para disminuir el espacio entre las hojas y la cama.
- **Composición de la materia prima**
    - La biomasa algal fue recolectada en la costa de Howth (Dublín, Irlanda) a mediados de enero del 2012 para los experimentos preliminares a mediados de febrero del 2012 tratadas el mismo día para el segundo experimento.

- **Inoculo**
    - Lodo digestivo fue utilizado como inoculo, este fue colectado de vasijas de lodo anaeróbico de aguas servidas en la planta de tratamiento de *Celtic Anglian wáter Ltd*, Ringsend, Dublin. Un estanque de 25 litros de lodo fue colectado el dia del experimento y usado inmediatamente
- **Preparación del biorreactor**
    - El sistema del biorreactor consiste en matraces con capacidad de 500 ml. El equipamiento se constituye de: válvulas de 2 y 3 vías, tubos de liberación rápida, cañerías y bolsas plásticas herméticas (para la recolección del biogás). Para preservar las condiciones anaeróbicas, el nitrógeno fue enrojecido durante dos minutos en los reactores con tal de eliminar cualquier traza residual de oxígeno de los matraces y cañerías.
- **Metodología experimental**
    - El propósito del primero experimento es identificar si existe algún beneficio en tratar los materiales y comparar cada especie de alga y su susceptibilidad al tratamiento. Reactores con 30 gramos de biomasa sin tratar de cada especia se les adiciono 200 ml de lodo. La máquina fue alimentada con un 1kg húmedo de cada especie de alga. Y 20 litros de agua. Después de 10 minutos de pretratamiento, cada reactor se prepara con 200 ml de pulpa algal y 200 ml de lodo (ratio 1:1). El baño de agua está a una temperatura de 37°C durante el proceso de fermentación. El experimento se replicó 4 veces para cada especie de alga y se comparó con muestras sin tratar. Como control dos digestores fueron preparados con exactamente la misma cantidad de inoculo usado en los co-digestores con tal de cuantificar la contribución del lodo a la formación de biogás
    - El segundo experimento apunta a encontrar los niveles óptimos de los factores, tales como el tiempo de molienda, la temperatura de fermentación, la cantidad de lodo por reactor, estudiando de este modo como estos parámetros afectan al rendimiento del biogás. El

pretratamiento se realizó en 1.6 Kg de biomasa algal húmeda con 20 litros de agua. Debido a su abundancia, se seleccionó la especia *Laminaria Digitata* para este experimento, y se realizaron dos replicas. Se utilizaron reactores con 15 gramos de biomasa húmeda sin tratamiento mientras los digestores de muestras tratadas se llenaron con 200 ml de pulpa algas; estas muestras fueron testeadas permutando varios factores.

- El contenido húmedo, tanto para la mezcla con pretratamiento como para la sin tratamiento, provee una comparación por gramo de solidos totales (ST=1 – contenido húmedo (%)). El peso medio de las muestras sin tratar es determinado a través del secado de pesos al azar. El contenido húmedo de las muestras tratas fue obtenido secando 200 ml de pulpa macroalgal en ambos experimentos. El secado se realizó a 105°C hasta obtener un peso constante.

Tabla 3-3: composición de algunas especies de algas (Fuente: [17])

Especie	*% CH s.t.*	*% CH c.t.*	*%Ceniza*	*%Nitrógeno*	*%FND*	*%FDA*	*%LDA*	*%CSA*
Laminaria digitata	78.2	99.3	19.5	3.3	25.7	22.3	12.1	4.4
Gracilaria Gracilis	77.3	99.6	16.6	2.6	53.6	46.6	25.3	0.3
Fucus Vesiculosus	78.2	99.2	19.6	1.9	35.3	28.1	16.4	0.9
Fucus Serratus	80.0	99.3	18.5	2.2	29.6	27.5	17.1	1.1
Pelvetia Caniculata	78.8	99.2	19.1	1.5	25.7	15.1	7.5	1.3

CH: contenido humedad
FND: fibras neutras detergente
FDA: fibras acidas detergentes
LDA: lignina acida detergente
CSA: Carbohidratos solubles en agua

3.7.2 Diseño del experimento

- Las condiciones por probar en el segundo experimento siguen una metodología de superficie de respuesta para 3 factores en 3 niveles. Esta metodología fue usada para mesurar rendimientos a través de un software estadístico, "Design-Expert v.8". la metodología de superficie de respuestas consiste en técnicas matemáticas y estadísticas las que son provechosas para el modelamiento, interpretando y prediciendo la respuesta de interés en varias variables (desde el nivel i al j) con la mira en la optimización de la respuesta "*y*", la cual en este caso es el volumen de biogás. Ya que el régimen de temperatura será fijo(37°C) se ha decidido estudiar solo pequeñas fluctuaciones en este parámetro.
- Entradas independientes de variables y niveles de factores son respectivamente 0, 5 y 10 minutos para el tiempo de moliendo, 35°C, 37°C y 39°C para las temperaturas en el rango mesofílico y finalmente 100,200 y 300 ml de lodos. El nivel 0 de tiempo de moliendo representa biomasa sin pretratamiento.

3.7.3 Resultados y discusiones

Producción de biogás

Tabla 3-4: Resultados preliminares de rendimiento de biogás para muestras con y sin tratamiento (Fuente:[17])

Biogás producido por muestras sin tratar ± DE [mL /gTS]*	*Biogás producido por muestras con tratamiento ± DE [mL/gTS]*	*Especie*
159.3±24.0	444.3 ± 13.4	*Pelvetia caniculata*
64.2 ± 21.1	181.2 ± 28.3	*Fucus serratus*
81.8 ± 32.5	171.8 ± 27.6	*Gracilaria Gracilis*
71.5 ± 4.9	230.5 ± 25.5	*Linnaeus*
103.3 ± 19.8	156.4 ± 16.7	*Laminaria Digitata*

**incubación a 37°C después de 21 días con valores de desviación estándar (DE)*

- Se observa en la tabla 3-4 que la producción de biogás aumenta al aplicar un pretratamiento a las macroalgas, consecuencia de la mayor área superficial del sustrato para los microrganismos presentes en los lodos. En particular se observa que la especie más productiva es *Pelvetia Caniculata.* Esto se debe a la composición de estas especies, ilustrado en la tabla 3-3.
- Para el segundo experimento se tienen los resultados mostrados en la tabla 3-5

Tabla 3-5: Cantidad de biogás generado variando parámetros (Fuente: [17])

experiencia N°	*T[°C]*	*T. molienda [min]*	*Cantidad de lodo [mL]*	*Volumen producido[mL/gTs]*
1	35	0	200	356.4
2	39	0	200	415.8
3	35	10	200	287.6
4	39	10	200	376.0
5	35	5	100	145.2
6	39	5	100	152.6
7	35	5	300	435.8
8	39	5	300	524.9
9	37	0	100	387.7
10	37	10	100	173.4
11	37	0	300	461.2
12	37	10	300	577.1
13	37	5	200	238.8
14	37	5	200	281.2
15	37	5	200	255.0
16	37	5	200	245.2
17	37	5	200	266.4

Cada condición fue replicada con n=2, se muestran resultados promedio

- Todas las muestras de biogás obtenidas tienen un contenido de metano del 40% promedio

3.7.4 Conclusiones

- Se utilizó un pretratamiento mecánico a macroalgas usando un "*Hollander Beater"*, comparando la generación de biogás a partir de estas con y sin pretratamiento.
- Los ensayos probaron que el pretratamiento mecánico aumenta la efectividad de la biodegradación.
- Algunas especies de macroalgas son más susceptibles que otras
- La ratio ideal de pulpa algas y la cantidad de lodo se identifica como 2:3, con el cual se puede obtener hasta un 20% extra de biogás llevando a cabo un pretratamiento de 10 minutos de molienda.
- La evaluación energética de 10 minutos de pretratamiento indica que se puede obtener una ganancia positiva del 90% neto en relación a los requerimientos del *"Hollander Beater".*

3.8 ENSAYOS EN *DURVILLAEA ANTÁRCTICA*, METANIZACIÓN SOLAR DE ALGAS ENDÉMICAS DE LA REGIÓN DE VALPARAÍSO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS COMBUSTIBLE [18]

Esta investigación consistió en la primera etapa de un estudio de biometanización solar cuya contribución radico en realizar la caracterización de la biomasa algal Durvillaea Antárctica a la que posteriormente se sometió a un ensayo BMP con la que se evaluó su potencial metanogénico y se analizó el biogás generado en condiciones de laboratorio a baja escala.

Se realizaron dos tipos de ensayo BMP, el primero de tipo botella invertida y el segundo con la utilización de envases Serum, en el cual se utilizaron dos montajes en paralelo, uno con la macroalga con tratamiento previo de temperatura y presión con el fin de romper la pared celular y facilitar la acción de las bacterias.

A continuación, se detallan los procedimientos utilizados y los resultados obtenidos

Paulo Dubó, realizo pruebas en riles con el fin de estudiar el comportamiento de la co-digestion del alga Durvillaea Antarctica en combinación con heces caninas. Para formar el inóculo se utilizó lodo como fuente de microbios anaeróbicos, ya activos, con el propósito de que la digestión anaerobia cuente con un ambiente apto para que el resto de las bacterias puedan ser activadas.

3.8.1 Riles

Para realizar la caracterización de la biomasa tanto como de las mezclas que se sometieron a ensayos de biodegradabilidad, fue necesario triturar la biomasa algas y realizar una dilución con agua destilada.

En primera instancia se obtuvo una dilución de 1000 ml de RIL, compuesta por 100 gramos de Durvillaea Antárctica en agua destilada. Se obtuvo una pasta densa, por lo cual se optó por formar una nueva dilución con menor densidad, con tal de favorecer el proceso de armado de mezclas y ensayos de biodegradabilidad. La nueva mezcla fue

realizada con 100 ml de la primera solución junto a un litro de agua destilada. Luego de esto, se realizó una vez más la caracterización de la mezcla.

Para caracterizar y hacer ensayos de biodegradabilidad de las heces caninas se utilizaron 56 gramos de estas diluidas con 500 ml de agua destilada.

3.8.2 Ensayo de biodegradabilidad anaeróbica

El fin de este ensayo es someter la muestra de biomasa a digestión anaeróbica estudiando los efectos de estas al ser sometidas a cambios en diferentes variables, tales como: tiempo de duración del ensayo, temperatura del baño térmico en donde se encuentran las muestras y volumen de muestras. Paralelamente se medirán otras variables, como, por ejemplo, la producción de metano, el porcentaje de remoción de sólidos y la biodegradabilidad anaerobia.

La biodegradabilidad anaerobia se define como la fracción máxima de materia orgánica susceptible de ser eliminada por digestión anaerobia, en unas determinadas condiciones de operación.

3.8.3 Potencial metanogénico del sustrato

Para medir la producción de biogás del proceso de digestión anaerobia del sustrato las mezclas serán sometidas a dos tipos de ensayos tipo BMP (biomethane potential)

3.8.3.1 Ensayo BMP botella invertida

Este ensayo consiste en dejar dentro del reactor una cantidad de masa fija, más conocido como metodología batch. El biogás producido fluye desde el reactor (1) hacia un frasco tipo Mariotte invertido (5) que contiene una solución alcalina (NaOH 2,5%), pasando previamente por un depósito antirretorno (4). El CO_2 que se produce en la digestión es absorbido por la solución alcalina, por lo que el volumen desplazado en el frasco Mariotte es producido por la presión que ejerce principalmente el metano al interior del frasco, el cual provoca que la solución se desplace hacia la probeta (6). La

producción de metano puede medirse a través del volumen desplazado de solución alcalina hacia la probeta graduada. La salida para toma de muestras se indican en (2) y (3) es por donde sale el biogás.

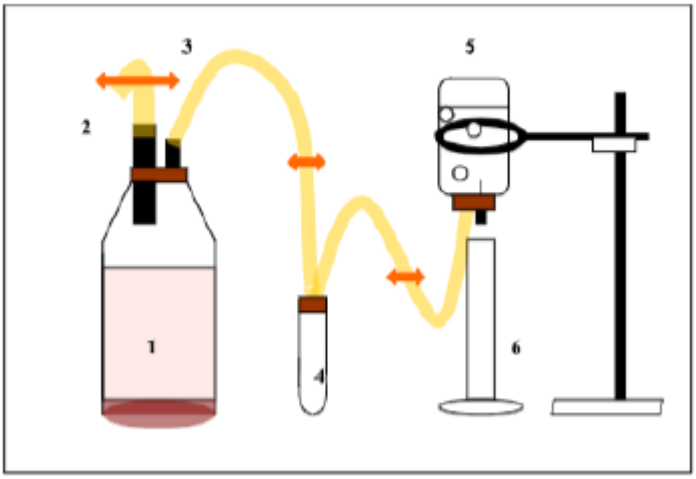


Ilustración 3-5:Esquema de equipos para ensayo de biodegradabilidad (Fuente: [18])

Armado de mezclas en mini reactores.

Se trabajo con 3 mezclas, cada una de ellas con distintas proporciones de mezcla para realizar el montaje de los mini reactores. Las mezclas utilizadas fueron en las siguientes proporciones: 90-10, 50-50 y 20-80(basado en la relación porcentual de cochayuyo-heces sobre el volumen efectivo del mini reactor). La razón por la cual se escogieron estas tres proporciones fue de tomar los dos casos extremos en cuanto a relación de una biomasa con la otra y además tener un punto medio a modo de referencia, para finalmente conocer cuál de estas tiene un mayor potencial metanogénico.

Los mini reactores utilizados corresponden a botellas de vidrio que poseen un volumen efectivo de 250 ml. Se trabajo con muestras en duplicado para cada caso estudiado, más dos blancos que solo contenían el inóculo y agua destilada.

Una vez listos los procedimientos previos en cada mini reactor, se procedió a realizar el montaje del sistema, poniendo las botellas en un baño térmico de agua destilada a 37°C.

3.8.3.2 Ensayo de BMP frasco Serum con sello hermético

Este ensayo es parecido al de botella invertida, pero en este caso se utilizan frascos Serum como mini reactores. El volumen de estos frascos es de 100 ml, los cuales están tapados con un septum PTFE/butyl y un sello hermético de aluminio, en donde va la mezcla sustrato-inóculo, tal como se observa en la siguiente figura.

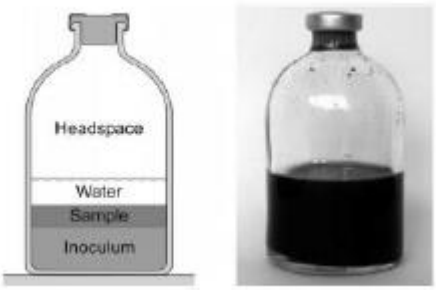


Ilustración 3-6: Frasco Serum (Fuente: [18])

El biogás se acumula en la zona por sobre el agua, por lo que debe destinarse entre el 40% y el 60% del volumen total del frasco para esta zona, siendo la parte resultante del volumen efectivo del digestor. Para este ensayo el volumen efectivo utilizado fue de 73,2 ml, dejando el resto del frasco Serum para la acumulación del biogás.

Al igual que en el ensayo BMP botella invertida, las mezclas y los blancos fueron puestos en un baño térmico a 37°C

3.8.4 Resultados experimentales

3.8.4.1 Caracterización inicial

En la tabla 3-6 se presentan los parámetros medidos para cada componente orgánico relevante en el proceso de digestión anaeróbica

Tabla 3-6: Caracterización inicial de cada biomasa (Fuente: [18])

Biomasa	*pH*	*DQO total [g/L]*	*DQO soluble [g/L]*	*SST [g/L]*	*SSV [g/L]*	*ST [g/L]*	*STV [g/L]*
Durvillae Antárctica	6,18	4,4	2,2	6,4	5,6	23,5	18
Heces	6,56	14,2	3,9	21,5	13,9	20,2	15,1
Inóculo	8,33	71,5	2,4	122,5	69,9	12,8	64,5

Junto a lo anterior, también se llevó a cabo la medición de distintos nutrientes en las distintas biomasas, en particular nitrógeno y fosforo, los resultados se muestran en la tabla 3-7.

Tabla 3-7:Nutrientes en cada biomasa (Fuente: [18])

Biomasa	*Nitrógeno [mg/L]*	*Fosforo [mg/L]*
Durvillaea Antárctica	1,196	8,485
Heces	77,54	1110,02
Inóculo	1032,18	2375,55

3.8.4.2 Resultados BMP ensayo de botella invertida

En la tabla número 3-8 se presentan los volúmenes correspondientes a cada biomasa dentro de la botella invertida junto con los nutrientes, elementos por los cuales estas están compuestas y los sustratos agregados para cumplir una relación C: N: P optima. El volumen del inoculo en cada botella es de 0,010472 [L].

Tabla 3-8: Volúmenes de biomasa y nutrientes en las botellas de 250 ml. Ensayo BMP botella invertida (Fuente: [18])

			Necesarios			*Presentes*	
Porcentaje mezcla	Vol alga [L]	Vol Heces[L]	mg C	mg N	mg P	mg N	mg P
90-10	0,215352	0,0239	2239,97	27,99	5,599	13,177	53,8537
50-50	0,11964	0,1196	3145,10	39,31	7,8627	20,484	159,283
20-80	0,047856	0,1914	3823,96	47,79	9,5599	25,965	238,356
Blanco	-	-	877,711	10,97	2,1942	11,064	25,4658

Se realiza una medición de los parámetros de entrada

Tabla 3-9: Medición de los parámetros de entrada en mezclas botellas 500 ml, ensayo BMP botella invertida (Fuente: [18])

Mezclas	*pH*	*DQO total [g/L]*	*DQO soluble [g/L]*	*SST [g/L]*	*SSV [g/L]*	*ST [g/L]*	*STV [g/L]*
90%-10%	6,7	10,7	3,3	16,2	11,1	42,6	28,6
50%-50%	6,8	12	4,4	48	37,2	138,8	102,1
20%-80%	7,1	26,1	2,9	48,3	35,1	123,8	85,5
Blanco	6,7	4,4	0,7	8,9	7	-	-

Se midió la presión dentro de las botellas invertidas de forma diaria durante 62 días, a las 12:00 horas con un rango de medición de ± 1 hora.

En la tabla 3-10 se muestran los ml de NaOH desplazados hacia la probeta graduada, los cuales son equivalentes al volumen de biogás generado en las muestras.

Tabla 3-10: Volumen de metano generado en ensayo BMP botella invertida (Fuente: [18])

Muestra	*Volumen de metano [ml]*
Mezcla 1	252
Mezcla 2	543
Mezcla 3	175
Blanco	125

A continuación, se presentan los parámetros de salida en las mezclas

Tabla 3-11: Mediciones de los parámetros de salida, concluido el ensayo BMP botella invertida (Fuente, [18])

Mezclas	*pH*	*DQO total [g/L]*	*DQO soluble [g/L]*	*SST [g/L]*	*SSV [g/L]*	*ST [g/L]*	*STV [g/L]*
90%-10%	7,6	3,5	3,5	1,1	6,5	7,2	4
50%-50%	7,1	4,7	4,7	1,3	9,7	8,4	5
20%-80%	7,1	9,2	2,5	2,5	13,8	11,3	7,2
Blanco	7,1	2,2	0,7	0,7	4,1	-	-

Con los datos obtenidos en la tabla 3-11 se puede calcular la biodegradabilidad de cada mezcla. Esta se calcula con la demanda química de oxígeno total medida antes y después del ensayo BMP según la ecuación 3.1.

$$Biodegradabilidad = \frac{DQO_{inicio} - DQO_{final}}{DQO_{inicio}} * 100 \quad (3.1)$$

Los resultados obtenidos utilizando ecuación 3.1 se presentan en la tabla 3-12

Tabla 3-12: Resultados de biodegradabilidad anaerobia ensayo BMP botella invertida (Fuente, [18])

Mezclas [%]	*DQO total inicial [g/L]*	*DQO total final [g/L]*	*Biodegradabilidad anaerobia [%]*
90-10	10,7	3,5	67,3
50-50	12	4,7	60,8
20-80	26,1	9,2	64,8

3.8.4.3 Resultados BMP con frascos Serum sin tratamiento previo

En la tabla 3-13 se presentan los volúmenes correspondientes a cada biomasa dentro de la botella junto con los nutrientes, elementos por los cuales estas están compuestas y los sustratos agregados para cumplir una relación C: N: P optima. El volumen del inoculo en cada botella es de 0,0035 [L].

Tabla 3-13: Volúmenes de biomasa y nutrientes en las botellas ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente, [18])

			Necesarios			*Presentes*	
Porcentaje mezcla	Volumen Cochayuyo [L]	Volumen Heces[L]	mg C	mg N	mg P	mg N	mg P
90-10	0,018	0,0008	383,3842	4,7923	0,9584	3,6962	9,3551
50-50	0,01	0,004	390,8583	4,8857	0,9771	3,9334	12,8393
20-80	0,004	0,0065	397,8843	4,9735	0,9947	4,1214	15,5635
Blanco	-	-	286,5661	3,5820	0,7164	3,6126	8,3144

En la tabla 3-14 se presentan los parámetros de entrada estudiados para las mezclas

Tabla 3-14: Medición de los parámetros de entrada en mezclas botellas ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: [18])

Mezclas	pH	DQO total [g/L]	DQO soluble [g/L]	SST [g/L]	SSV [g/L]	ST [g/L]	STV [g/L]
90%-10%	8,1	7,9	1,5	13,8	9,5	7,6	4,7
50%-50%	7,9	12,7	1,8	20,6	14,2	14,8	9,2
20%-80%	7,9	12,3	1,5	20,3	13,2	19,1	12,3
Blanco	8,9	8,6	0,8	12,3	7,7	7,6	3,7

La presión fue medida durante 49 días, a las 12:00 con un rango de variación de ± 1 hora.

Para determinar el volumen de biogás generado en cada reactor, se consideró este como un gas ideal (ecuación 3.2). Es requerido calcular los moles de biogás a partir de la fórmula 3.3, tomando como parámetros el volumen efectivo del mini reactor, la temperatura de este regida mediante el baño térmico, la presión observada en el presurímetro en atmosferas y la constante de gas ideal.

$$P * V = n * R * T \quad (3.2)$$

$$n = \frac{P_p * V_r}{R * T_b} \quad (3.3)$$

P_p: Presión registrada por el presurímetro en atmosferas

V_r: Volumen efectivo del mini reactor en litros

T_b: Temperatura del baño térmico en kelvin

R: Constante de gas ideal

n: Moles de biogás

Luego de calcular los moles de biogás, se utiliza la formula una segunda vez para determinar el volumen de biogás bajo condiciones normales de operación (1 atmosfera y temperatura ambiente de 293,15 K).

Se presentan los volúmenes de biogás generados por cada mezcla al final del tiempo de prueba

Tabla 3-15: Valor de volumen de biogás generados durante el ensayo BMP sin tratamiento previo (Fuente: [18])

Muestra	*Volumen de biogás total [ml]*
Muestra 1	52
Muestra 2	67
Muestra 3	78
Blanco	

A continuación, se presentan las mediciones de los parámetros de salida de las mezclas

Tabla 3-16: Mediciones de los parámetros de salida, concluido el ensayo de BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: [18])

Mezclas	*pH*	*DQO total [g/L]*	*DQO soluble [g/L]*	*SST [g/L]*	*SSV [g/L]*	*ST [g/L]*	*STV [g/L]*
90%-10%	7,3	3,3	0,6	6,4	5,6	5,4	3,5
50%-50%	7,	5,2	0,6	12,5	9,6	7,5	4,3
20%-80%	7,4	5	0,4	8,2	5,6	8,6	5
Blanco	7,7	1,7	0,6	5,6	5,2	3,4	2

Al igual que en el caso anterior, se utiliza la fórmula 3.1 para obtener el porcentaje de biodegradabilidad anaerobia. Los resultados se muestran en la siguiente tabla 3-17.

Tabla 3-17: Resultados de biodegradabilidad anaerobia ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento (Fuente: [18])

Mezclas [%]	*DQO total inicial [g/L]*	*DQO total final [g/L]*	*Biodegradabilidad anaerobia [%]*
90-10	7,9	3,3	58
50-50	12,7	5,2	59
20-80	12,3	5	59

3.8.5 Resultados BMP con frascos Serum con tratamiento previo.

En la tabla 3-18 se presentan los volúmenes correspondientes a cada biomasa dentro de la botella junto con los nutrientes, elementos por los cuales estas están compuestas y los sustratos agregados para cumplir una relación C: N: P optima. El volumen del inoculo en cada botella es de 0,0035 [L].

Tabla 3-18: Volúmenes de biomasa y nutrientes en las botellas ensayo BMP frasco Serum con tratamiento previo (Fuente: [18])

			Necesarios			*Presentes*	
Porcentaje mezcla	Volumen Cochayuyo [L]	Volumen Heces[L]	mg C	mg N	mg P	mg N	mg P
90-10	0,0240	0,0008	404,3296	5,0541	1,0108	3,7243	9,3735
50-50	0,015	0,004	403,2335	5,0404	1,0080	3,9507	12,8507
20-80	0,0065	0,0065	407,7111	5,0963	1,0192	4,1301	15,5787
Blanco	-	-	286,5661	3,5821	0,7164	3,6126	8,3144

Medición de parámetros de entrada

Tabla 3-19: Medición de los parámetros de entrada en mezclas botellas ensayo BMP frasco Serum con tratamiento previo (Fuente: [18])

Mezclas	*pH*	*DQO total [g/L]*	*DQO soluble [g/L]*	*SST [g/L]*	*SSV [g/L]*	*ST [g/L]*	*STV [g/L]*
90%-10%	7,7	8,7	1,8	12,1	5,3	16,5	6,7
50%-50%	7,5	9,3	1,4	18,2	9,6	23,2	10,6
20%-80%	6,8	11,2	1,4	47,5	15,6	86,7	22,5
Blanco	8,1	13,7	0,6	17,5	6,2	30,6	12,3

La presión fue registrada de forma diaria durante 47 días con un presurímetro, a las 12:00 horas con un rango de variación de ± 1 hora.

Para calcular el volumen de biogás generado en base a la presión se utilizó el mismo procedimiento que en el caso del ensayo BMP sin tratamiento previo. En la tabla 3-20 se muestran los volúmenes en ml producidos por cada mezcla con tratamiento previo.

Tabla 3-20: Valor de volumen de biogás generados durante el ensayo BMP con tratamiento previo (Fuente: [18])

Muestra	*Volumen de biogás total [ml]*
Muestra 1	78
Muestra 2	73
Muestra 3	0,2
Blanco 5	0

Se adjuntan las mediciones de los parámetros de salida para las mezclas con tratamiento previo

Tabla 3-21: Mediciones de los parámetros de salida, concluido el ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: [18])

Mezclas	pH	DQO total [g/L]	DQO soluble [g/L]	SST [g/L]	SSV [g/L]	ST [g/L]	STV [g/L]
90%-10%	7,3	4,5	0,7	10,8	7,9	11,2	6,7
50%-50%	7,4	1,4	0,5	12,2	10,1	7,9	4,2
20%-80%	6,6	7,8	1,3	22,6	11,1	63,4	2,6
Blanco	7,3	2,3	0,4	13,7	11,1	12,3	9

Finalmente se procede a calcular la biodegradabilidad anaerobia para las mezclas con pretratamiento de biomasa algal.

Tabla 3-22: Resultados de biodegradabilidad anaerobia ensayo BMP frasco Serum con tratamiento previo (Fuente: [18])

Mezclas [%]	DQO total inicial [g/L]	DQO total final [g/L]	Biodegradabilidad anaerobia [%]
90-10	8,7	4,5	48
50-50	9,3	1,4	85
20-80	11,2	7,8	30

3.8.6 Resultados cromatografía de gases

Se realizo un análisis en cromatógrafo a las muestras de ensayos BMP con frascos Serum, con tal de poder analizar la composición porcentual de los gases generados. Los resultados se muestran en las tablas 3-23 y 3-24 respectivamente.

Tabla 3-23: Resultados análisis cromatografía de biogás, muestras sin tratamiento previo (Fuente:[18])

Mezcla sin tratamiento	Presión transductor [mbar]	Aire [%]	CH4 [%]	CO2 [%]	H2S [%]
1	45	41	48	11	0
2	80	32	55	13	0
3	90	31	57	12	0
Blanco	20	100	0	0	0

Tabla 3-24: Resultados análisis cromatografía de biogás, muestras con tratamiento previo (Fuente: [18])

Mezcla sin tratamiento	*Presión transductor [mbar]*	*Aire [%]*	*CH4 [%]*	*CO2 [%]*	*H2S [%]*
1	50	35	52	13	0
2	50	36	52	12	0
Blanco	20	100	0	0	0

Observación: *En las mezclas sin tratamiento previo no se realizó análisis en cromatógrafo en los blancos, debido a que se tomó como referencia los blancos de las pruebas sin tratamiento, ya que poseen la misma composición. Para la mezcla n°3 no se realizó mediciones en cromatógrafo ya que en la etapa de medición de presión previa al análisis su valor fue cero.*

A partir de las tablas 3-23 y 3-24 presentadas anteriormente, se calcula el volumen de metano presente en cada muestra. Al volumen de biogás para ambas muestras se les debe restar el blanco con tal de restar el efecto del inóculo añadido previa experimentación

Tabla 3-25: Volumen de metano generado al finalizar el ensayo BMP con frascos Serum (Fuente: [18])

	Sin tratamiento previo			*Con tratamiento previo*		
Mezcla	Volumen de biogás efectivo [ml]	CH4 [%]	Volumen de CH4 presente en la muestra [ml]	Volumen de biogás efectivo [ml]	CH4 [%]	Volumen de CH4 presente en la muestra [ml]
1	47	48	22,56	78	52	40,56
2	62	55	34,1	73	52	37,96
3	73	57	41,61	2	-	-

4 DISEÑO DEL EQUIPO BIODIGESTOR

En esta sección se detallan los parámetros constructivos y funcionales de un biodigestor con inyección de energía solar, con tal de mantener las condiciones de operación de flujo estacionario.

4.1 PARÁMETROS CONSTRUCTIVOS SISTEMA BIODIGESTOR

El diseño del equipo biodigestor fue inspirado por los equipos presentes en las instalaciones del laboratorio de bioenergía de la Universidad Técnica Federico Santa María. Este equipo consiste en dos reactores de 14 litros conectados en serie. Para este trabajo se decidió escalar las dimensiones del equipo antes nombrado, llevando su volumen nominal a 30 litros, manteniendo los parámetros operacionales y constructivos. Además, se decidió agregar un sistema de energía fotovoltaica para los requerimientos energéticos del equipo, permitiendo una operación tanto dual como fuera de la red eléctrica.

El biodigestor será diseñado para operación bajo un régimen de flujo estacionario, con un estanque interno de 30 litros y un estanque exterior levemente más grande. Se considera como condiciones de operación un volumen de mezcla de 27 litros y temperatura de 35°C. El propósito del estanque exterior es funcionar como una camisa térmica para mantener las condiciones de operación del tanque interior lo más estables posibles.

La camisa exterior llevara un revestimiento de lana mineral “Aislanroll” de 50 milímetros de espesor. El coeficiente de conducción de calor de este material es de 0,03 watts por metro Kelvin. Por la tapa superior y en la base ira una capa circular del mismo aislante.

En el espacio intermedio de los estanques se llenará con agua con tal de entregar calor al estanque interno y que el proceso de biodigestión se pueda realizar de forma correcta. Esta agua será calentada mediante resistencias eléctricas, las cuales serán alimentadas por un sistema de paneles fotovoltaicos.

En la parte superior del estanque interior habrá 4 agujeros los cuales tendrán las siguientes funciones:

- Poder introducir un agitador acoplado a un motor eléctrico, con sistema de sello hidráulico.
- Poder ingresar al biodigestor sistemas de control de variables tales como pH, Temperatura, concentración de CO_2 entre otros. Entrada con sello hidráulico.
- Salida de gas

En el manto, tanto del cilindro interior como exterior, habrá perforaciones coaxiales por las cuales se instalarán cañerías, con sus respectivos sellos para que pueda circular la biomasa, manteniendo un régimen de operación estacionario.

El estanque exterior tendrá una salida con válvula por la zona inferior de su manto con tal de poder vaciar este cuando se termine de realizar una prueba.

En las figuras 4-1, 4-2 y 4-3 se presenta una vista isométrica del equipo y los planos asociados a este.

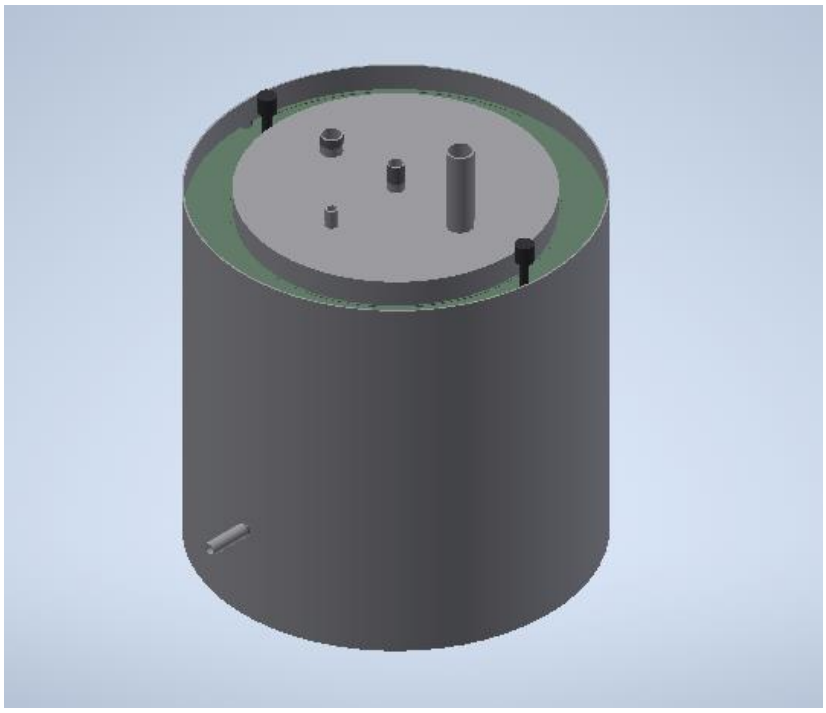


Ilustración 4-1: Vista isométrica biodigestor (Fuente: elaboración propia)

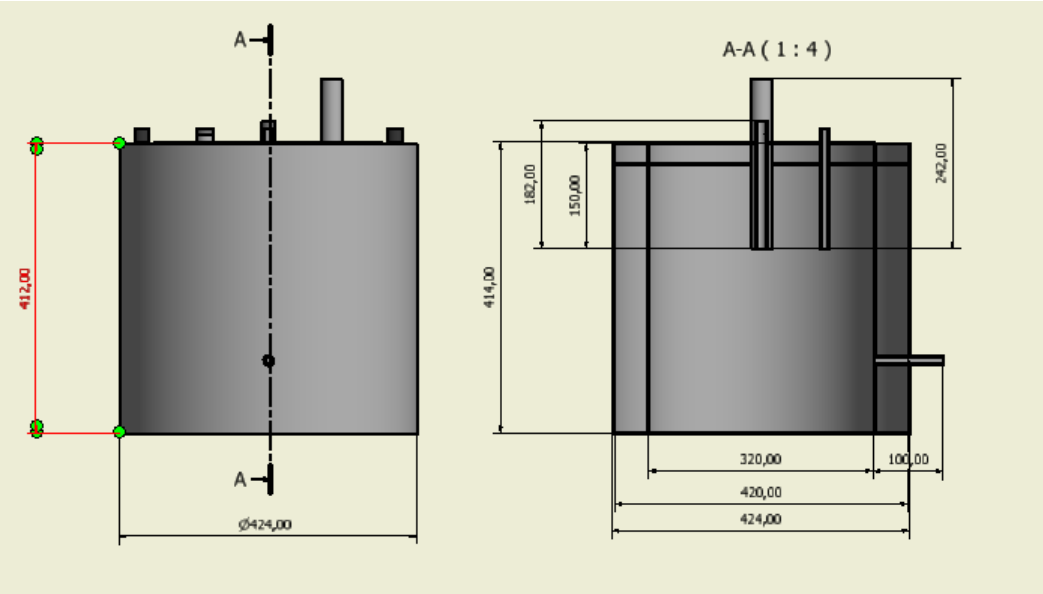


Ilustración 4-2: Plano constructivo equipo biodigestor (Fuente: elaboración propia)

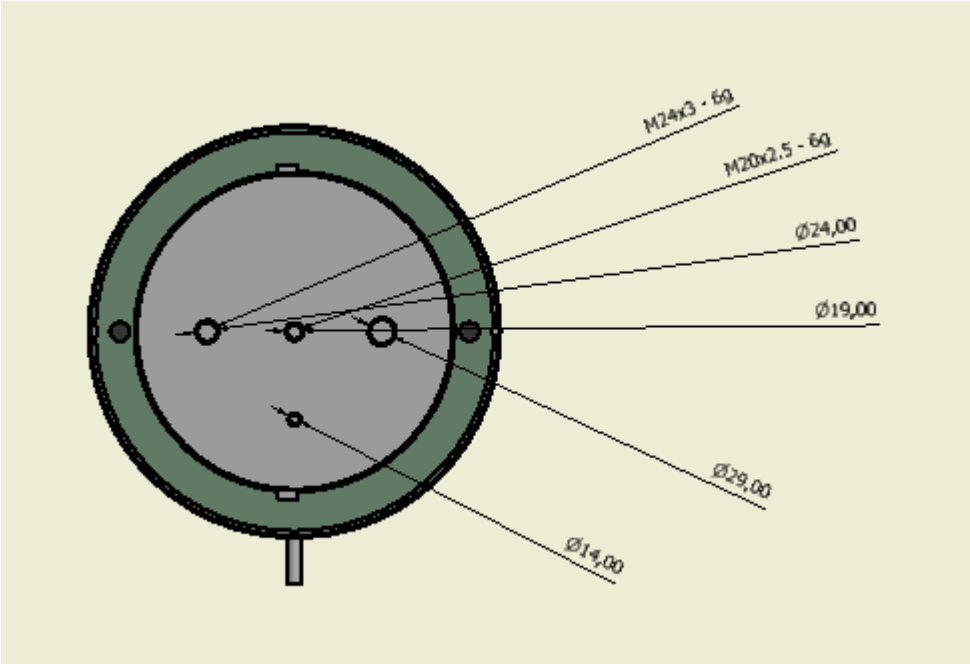


Ilustración 4-3: plano constructivo equipo biodigestor (Fuente: elaboración propia)

Tabla 4-1: medidas principales estanques (Fuente: elaboración propia)

Ítem	*Diámetro interno [mm]*	*Diámetro exterior[mm]*	*Altura [mm]*
Estanque interior	320	324	414
Estanque exterior	420	424	414
Aislante	424	524	414

4.2 EXPERIMENTOS PREVIOS

4.2.1 Determinación densidad del alga Durvillaea Antarctica

Para gran parte de los cálculos a realizar a continuación es necesario un dato fundamental, la densidad del alga estudiada, por lo cual se realiza un experimento simple para determinar esta.

Los instrumentos por utilizar en estas mediciones son una pesa digital marca Dblue con resolución de 0,1 gramos y una probeta graduada de marca Joan lab con resolución de 1 ml.

Se lleno la probeta con 30 ml de agua, luego se procedió a pesar cada pedazo de alga y luego insertarlo en la probeta para medir el volumen desplazado, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4-2.

Tabla 4-2: Medición densidad alga Durvillaea Antárctica (Fuente: elaboración propia)

Medición	**Peso [g]**	**Volumen desplazado [ml]**	**Densidad [g/ml]**
1	2,7	2,5	1,08
2	3,5	3	1,166
3	1,1	1	1,1
4	2,4	2,3	1,043
5	1,8	2	0,9

Como se puede observar de la tabla 4-2, la densidad del alga no es homogénea, por lo cual para futuros cálculos se decide tomar la densidad promedio de estas 5 mediciones:

$$\rho_{alga} = 1{,}0578\left[\frac{g}{ml}\right] = 1057{,}8\left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

4.2.2 Determinación densidad de la mezcla

Utilizando los mismos instrumentos nombrados en el punto 4.2.1 se procede a determinar la densidad de la mezcla en el caso en que esta podría ser mayor, es decir, cuando la proporción de mezcla en volumen sea 1:5 de algas y agua respectivamente.

Se llena la probeta con 30 ml de agua y se agrega a esta alga hasta que la lectura sea de 36 ml, consiguiendo así una mezcla en razón 1:5 de algas y agua. Se registra el peso de las algas agregadas para conseguir este volumen, siendo este peso de 6 gramos. Por lo tanto, la densidad de la mezcla es:

$$\rho_{mezcla} = \frac{30\ [g]_{agua} + 6\ [g]_{alga}}{36\ [ml]} = \frac{36[g]_{mezcla}}{36\ [ml]} = 1\ \left[\frac{g}{ml}\right] = 1000\left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

4.3 CÁLCULO DE CALOR REQUERIDO

4.3.1 Supuestos y condiciones a considerar

Para determinar el calor que es necesario agregar para mantener las condiciones de operación requeridas se tomaran una serie de supuestos y condiciones, las cuales se detallan a continuación.

- El lugar físico en que se emplazará el modelamiento será en la sede José Miguel Carrera de la universidad técnica Federico Santa María, ubicada entre el límite de las comunas de Quilpué y Viña del Mar. Las condiciones geográficas de este sitio son más similares a las de la comuna de Quilpué que las de Viña del Mar, por lo cual se utilizaran las condiciones ambientales de la primera.
- Se tomará la temperatura promedio de 30 días en la comuna de Quilpué como referencia para los cálculos. Este periodo considera del 01 de junio al 30 de junio.
- Se considerará el periodo antes nombrado ya que, para hacer el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico, hay que hacer este en las condiciones más desfavorables posibles, es decir el mes más helado y con menor radiación solar.
- La biomasa que ingresa al biodigestor se encuentra a temperatura ambiente al estar este en un estanque de carga en el exterior.
- La biomasa al interior del biodigestor se encuentra perfectamente mezclada a 35 grados Celsius.
- El fluido del baño térmico se encuentro a 35 grados Celsius mezclado perfectamente.
- Las pérdidas de calor del equipo son a través del manto, tapa superior e inferior del estanque exterior.
- Se toma como momento de partida del ensayo cuando se logran las condiciones de operación, por lo cual en el cálculo de calor requerido para lograr estas no se considerarán las perdidas, sino solamente el calor requerido para llevar la biomasa a 35 grados Celsius.

- El agua del baño térmico se encuentra estática y sin cambios de fase, por lo cual la transferencia entre el agua y la cara interna del estanque exterior se da mediante conducción.
- Las pérdidas de calor del estanque exterior se dan a través de convección natural.
- Para el llenado inicial del estanque interior se llevará la temperatura del baño térmico a 35°C y se ira vertiendo lentamente la mezcla de alga-agua con tal de no generar cambios de temperatura drásticos en la población microbiana presente al fondo del estanque interior.

Tabla 4-3: Conductividad térmica de los materiales involucrados en los cálculos de transferencia de calor (Fuente: elaboración propia)

Material	*Conductividad térmica [W/m*K]*
Agua	0,613
Aire	0,026
Lana de vidrio	0,03
Acero inoxidable	16,3

4.3.2 Balance de masa en el equipo biodigestor

Por criterios de diseño, el volumen al interior del equipo biodigestor debe permanecer constante, por lo cual el flujo de masa que entra debe ser igual al que sale, lo cual queda expresado a través de la siguiente ecuación.

$$m_{entrada} - m_{salida} = \Delta m_{VC} \quad (4.1)$$

Como se desea que no haya variación de masa al interior del equipo:

$$\Delta m_{VC} = 0$$

Por lo cual:

$$m_{entrada} = m_{salida}$$

Por lo cual se determina que los criterios de diseño cumplen con el balance de masa dentro del volumen de control. Se muestra esta situación en la ilustración 4-4.

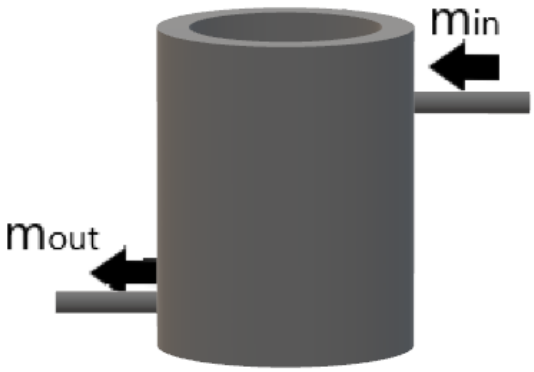


Ilustración 4-4: Balance de masa equipo biodigestor (Fuente: elaboración propia)

4.3.3 Balance de energía en el equipo biodigestor

En esta sección se pretende dilucidar que flujos de calor que se ven involucrados en la problemática estudiada. El esquema general se presenta en la ilustración 4-5.

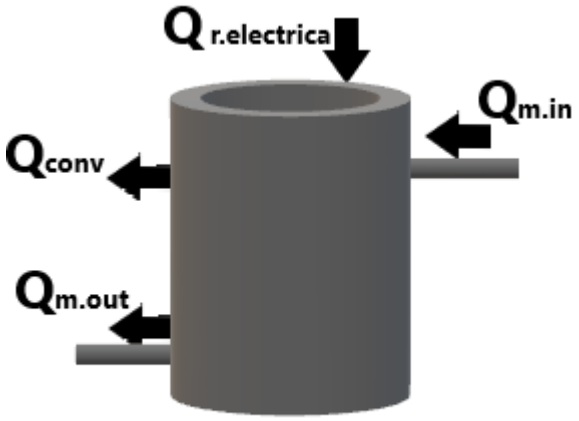


Ilustración 4-5: Balance de energía biodigestor (Fuente: elaboración propia)

Los flujos mostrados corresponden a:

- Q_{conv} : corresponde a las pérdidas de calor debido a la convección natural, de tanto el manto como la tapa superior e inferior hacia el aire circundante.
- $Q_{m.out}$: hace referencia al calor que abandona el sistema a través del flujo saliente de biomasa.
- $Q_{m.in}$: es el calor asociado a la biomasa entrante al sistema.
- $Q_{r.electrica}$: corresponde al calor que hay que agregar al sistema a través de resistencias eléctricas para mantener este en condiciones de operación, considerando todas las pérdidas de calor a través de convección y el calor necesario para elevar la temperatura de la biomasa.

Durante un proceso de flujo estacionario, el contenido de energía total de un volumen de control permanece constante; por lo tanto, el cambio en la energía total del volumen de control es cero. En consecuencia, la cantidad de energía que entra al volumen de control en todas las formas debe ser igual a la cantidad de energía que sale.

Planteando el balance de energía para este sistema:

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema} \quad (4.2)$$

Lo que se busca es que la variación dentro del sistema sea nula, por lo tanto:

$$\Delta E_{sistema} = 0$$

Por lo que el balance queda como:

$$E_{entrada} = E_{salida}$$

Entre las energías que entran encontramos el calor cedido por las resistencias eléctricas y el calor asociado a la biomasa entrante. Entre las energías que abandonan el sistema encontramos las perdidas por convección y el calor asociado a la biomasa saliente. Por lo cual la expresión que determina cuanto calor será necesario agregar a través de las resistencias eléctricas queda expresada como:

$$Q_{R.electrica} = Q_{conv} + Q_{m.out} - Q_{m.in} \quad (4.3)$$

4.3.4 Registro de temperaturas

A continuación, en la tabla 4-4, se presenta el registro de temperaturas de la comuna de Quilpué desde el 21 de marzo del 2020 al 3 de junio del 2020.

Tabla 4-4: Registro de temperaturas en la comuna de Quilpué (Fuente: www.meteored.cl)

Dia	Temperatura [K]	Dia	Temperatura[K]	Dia	Temperatura[K]
01-jun	287	**11-jun**	285	**21-jun**	287
02-jun	284	**12-jun**	286	**22-jun**	285
03-jun	284	**13-jun**	288	**23-jun**	285
04-jun	284	**14-jun**	285	**24-jun**	284
05-jun	285	**15-jun**	286	**25-jun**	286
06-jun	283	**16-jun**	286	**26-jun**	285
07-jun	284	**17-jun**	284	**27-jun**	285
08-jun	285	**18-jun**	284	**28-jun**	285
09-jun	287	**19-jun**	286	**29-jun**	285
10-jun	284	**20-jun**	286	**30-jun**	286

4.3.5 Cálculo de radio critico de aislamiento

Como no se sabe de antemano el valor especifico de coeficiente de convección natural del aire en este problema, se tomarán los dos casos límites de este estipulados por la literatura

$$h_{convección\ natural\ aire} = 5 - 25\ [\frac{w}{m^2K}]$$

$$r_{critico\ cilindro} = \frac{k}{h}[m] \quad (4.4)$$

Donde:

- k: conductividad térmica del aislamiento
- h: coeficiente externo de convección

por lo que se tiene como posibles resultados límite para la ecuación 4.4:

$$r_{critico\ maximo} = \frac{0{,}03\left[\frac{w}{m*K}\right]}{5\ [\frac{w}{m^2K}]} = 6*10^{-3}[m]$$

$$r_{critico\ minimo} = \frac{0{,}03\ \left[\frac{w}{m * K}\right]}{25[\frac{w}{m^2 K}]} = 1{,}2 * 10^{-3}[m]$$

Por lo cual, bajo el peor caso, cualquier espesor de aislante mayor a los 6 milímetros significara uso efectivo de este en el modelo.

4.3.6 Cálculo de coeficiente natural de convección del aire

Para obtener el valor de coeficiente de convección natural de un fluido es sumamente complicado y esto se suele realizar mediante métodos empíricos, como en este caso eso no es posible, se realizan estimaciones de este parámetro utilizando números adimensionales, principalmente el número de Nusselt, el cual se define del siguiente modo:

$$Nu = \frac{h * L_c}{k} \quad (4.5)$$

Donde:

- h: coeficiente de convección del fluido
- L_c: longitud característica de la geometría
- k: conductividad térmica del fluido

El número de Nusselt también puede ser expresado a través de números adimensionales del siguiente modo:

$$Nu = C(Gr_L * P_r)^n = C * Ra_L^n \quad (4.6)$$

Donde:

- C: valor que depende de la configuración geométrica de la superficie
- n: valor que depende de la configuración geométrica de la superficie
- Gr_L: número de Grashof
- Pr: número de Prandtl
- Ra_L: número de Rayleigh

Los cuales se expresan:

$$Gr_L = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{\nu^2} \quad (4.7)$$

Donde:

- g: aceleración gravitacional
- β: coeficiente de expansión volumétrica
- T_s: temperatura de la superficie
- T_∞: temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie
- L_c: longitud característica de la configuración geométrica
- ν: viscosidad cinemática del fluido

$$Pr = \frac{\mu * c_p}{k} \quad (4.8)$$

Donde:

- C_p: calor especifico del fluido a presión constante
- μ : viscosidad del fluido
- k: conductividad térmica del fluido

$$Ra_L = Gr_L * Pr \quad (4.9)$$

Para poder calcular el número de Nusselt en una geometría cilíndrica se debe cumplir la siguiente relación, la cual permite modelar la superficie como una placa plana vertical.

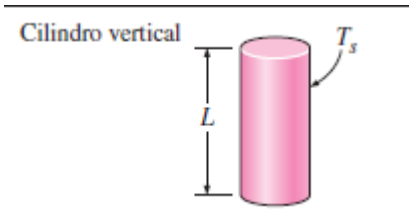


Ilustración 4-6: Parámetros para la modelación de un cilindro como placa plana vertical utilizando número de Nusselt (Fuente: [5])

$$D \geq \frac{35 * L}{Gr_L^{\frac{1}{4}}} \quad (4.10)$$

Como no hay modo de saber la temperatura de la superficie en este punto, se toma un valor de 22 grados Celsius. Para la temperatura ambiente se toma el promedio de los 30 días.

Se procede a calcular el número Grashof para este escenario

$$Gr_L = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{\nu^2}$$

Donde:

- $g = 9.8\ [\frac{m}{s^2}]$
- $\beta = 1/288[\frac{1}{K}]$
- $T_s = 295[K]$
- $T_\infty = 288[K]$

- $L_c = 0.414[m]$
- $\nu = 15.1 * 10^{-6}[\frac{m^2}{s}]$

Por lo cual:

$$Gr_L = \frac{9.8\ [\frac{m}{s^2}] * (295[K] - 288[K]) * (0.414[m])^3}{288[K] * (15.1 * 10^{-6}[\frac{m^2}{s}])^2} = 74127398.14[-]$$

Evaluando en la expresión para verificar el uso del número de Nusselt

$$D \geq \frac{35 * L}{Gr_L^{1/4}}$$

$$0.42[m] \geq \frac{35 * 0.414[m]}{74127398.14^{1/4}}$$

$$0.42[m] \geq 0.1561[m] \quad (4.11)$$

Debido a que la relación 4.11 se cumple se puede modelar la geometría cilíndrica como una placa plana vertical para obtener el número de Nusselt

La ecuación para calcular el número de Nusselt en una placa plana vertical depende del número de Rayleigh obtenido para la geometría, por lo cual se procede a calcular este número.

Se obtuvo anteriormente el número de Grashof, por lo cual se procede a calcular el número de Prandtl.

$$Pr = \frac{\mu * c_p}{k}$$

Donde:

- $C_{p\ aire} = 1012[\frac{J}{Kg*K}]$
- $\mu_{aire} = 0.000018[\frac{Kg}{s*m}]$
- $k_{aire} = 0.026[\frac{w}{m*K}]$

Remplazando valores

$$Pr = \frac{0.0018[\frac{Kg}{s*m}] * 1012\left[\frac{J}{Kg*K}\right]}{0.026[\frac{w}{m*K}]} = 0.7[-]$$

Con el valor de los números de Prandtl y Grashof se procede a calcular el número de Rayleigh

$$Ra_L = Gr_L * Pr = 74127398.14[-] * 0.7[-] = 51934795.55[-]$$

Se observa que este valor de numero de Rayleigh cumple la condición presentada en la ecuacion 5.12.

$$10^4 < 51934795.55 < 10^9 \quad (4.12)$$

Por lo cual el número de Nusselt para este caso queda expresado como:

$$Nu = 0.59 * Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (4.13)$$

4.3.7 Cálculo de pérdidas de calor por el manto cilíndrico

Tomando como base que el flujo de calor por conducción a través del manto cilíndrico es igual al flujo de calor por convección en la superficie exterior del manto cilíndrico, se desarrolla la siguiente expresión para calcular la temperatura de superficie exterior. Se realizarán 30 iteraciones para este cálculo, una por cada día, para así poder calcular las temperaturas de superficie promedio en base diaria.

$$\dot{Q}_{Conducción} = \dot{Q}_{Convección} \quad (4.15)$$

$$\frac{T_i - T_s}{\frac{Ln(r_{ext.cil} - r_{int.cil})}{2 * \pi * k_{ac} * L_{cil}} + \frac{Ln(r_{ais} - r_{ext.cil})}{2 * \pi * k_{ais} * L_{ais}}} = \frac{0.59 * k_{air}}{L_c} * \left(\frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{(\upsilon)^2} * \frac{\mu * C_p}{k_{air}}\right)^{\left(\frac{1}{4}\right)} * A_{ext} * (T_s - T_\infty) \quad (4.16)$$

Donde:

- T_i: temperatura al interior del biodigestor
- T_s: temperatura de la superficie exterior del biodigestor
- $r_{ext.cil}$: radio exterior del estanque exterior
- $r_{int.cil}$: radio interior del estanque interior
- r_{ais}: radio exterior del aislante térmico
- k_{ac}: coeficiente de conducción del acero inoxidable
- k_{ais}: coeficiente de conducción del aislante
- L_{cil}: altura del estanque exterior
- L_{ais}: altura del aislante
- k_{air}: coeficiente de conducción del aire
- L_c: longitud característica de la superficie
- g: aceleración de gravedad

- β: coeficiente de expansión volumétrica del fluido
- T_∞: temperatura del fluido
- μ: viscosidad del aire
- C_p: calor especifico del aire
- ν: viscosidad cinemática del fluido
- A_{ext}: área exterior del manto cilíndrico de aislante

Reemplazando por los valores de la situación:

- $Ti = 308[K]$
- $Ts: Por\ determinar$
- $r_{ext.cil} = 0.212[m]$
- $r_{int.cil} = 0.210[m]$
- $r_{ais} = 0.262[m]$
- $k_{ac} = 16.3[\frac{w}{m*K}]$
- $k_{ais} = 0.03[\frac{w}{m*K}]$
- $L_{cil} = 0.414[m]$
- $L_{ais} = 0.414[m]$
- $k_{air} = 0.026[\frac{w}{m*K}]$
- $L_C = 0.414[m]$
- $g = 9.8[\frac{m}{s^2}]$
- $\beta = \frac{1}{T_\infty}$
- $T_\infty = temperatura\ ambiente\ dependiendo\ del\ dia$
- $\mu = 0.000018[\frac{Kg}{s*m}]$
- $C_p = 1012[\frac{J}{Kg*K}]$
- $\nu = 15.1 * 10^{-6}[\frac{m^2}{s}]$
- $A_{ext} = 0.2156[m^2]$

Reemplazando los términos que son constantes para cada iteración la expresión queda reducida a:

$$0.3684 * (308 - T_s) = 0.007988 * \left(7412739 * \frac{(T_s - T_\infty)}{T_\infty}\right)^{\left(\frac{1}{4}\right)} * (T_s - T_\infty)$$

Y elevando a la cuarta potencia

$$0.01841 * (308 - T_s)^4 = 4.071 * 10^{-9} * \left(7412739 * \frac{(T_s - T_\infty)}{T_\infty}\right) * (T_s - T_\infty)^4 \quad (4.17)$$

La expresión 4.17 será resuelta mediante un código en Python para obtener la temperatura de superficie promedio en cada iteración, teniendo como parámetros de entrada la temperatura ambiente asociada a cada día. Los resultados se muestran en la tabla 4-5.

Tabla 4-5: Temperatura promedio de superficie del manto cilíndrico (Fuente: elaboración propia)

Dia	Temperatura [K]	Dia	Temperatura[K]	Dia	Temperatura[K]
01-jun	300,73	**11-jun**	299,92	**21-jun**	300,73
02-jun	299,51	**12-jun**	300,33	**22-jun**	299,92
03-jun	299,51	**13-jun**	301,13	**23-jun**	299,92
04-jun	299,51	**14-jun**	299,92	**24-jun**	299,51
05-jun	299,92	**15-jun**	300,33	**25-jun**	300,33
06-jun	299,10	**16-jun**	300,33	**26-jun**	299,92
07-jun	299,51	**17-jun**	299,51	**27-jun**	299,92
08-jun	299,92	**18-jun**	299,51	**28-jun**	299,92
09-jun	300,73	**19-jun**	300,33	**29-jun**	299,92
10-jun	299,51	**20-jun**	300,33	**30-jun**	300,33

4.3.8 Cálculo de pérdidas de calor por la tapa superior e inferior

4.3.8.1 Tapa superior

Al igual que en la sección 4.3.6, el primer paso es calcular el número de Raleigh para determinar la formula del número de Nusselt asociada a la geometría. Por lo cual primero se calcula el número de Grashof tomando las mismas condiciones referenciales que en la sección 4.3.6, es decir, una temperatura de superficie de 22 grados Celsius.

$$Gr_L = \frac{9.8\left[\frac{m}{s^2}\right] * (295[K] - 288[K]) * (0.106[m])^3}{288[K] * (15.1 * 10^{-6}\left[\frac{m^2}{2}\right])^2} = 1244426.21[-]$$

El valor del número de Prandtl se mantiene igual que en la sección 4.3.6.

$$Pr = \frac{0.0018\left[\frac{Kg}{s * m}\right] * 1012\left[\frac{J}{Kg * K}\right]}{0.026[\frac{w}{m * K}]} = 0.7[-]$$

Por lo cual el valor del número de Rayleigh es:

$$Ra_L = Gr_L * Pr = 1244426.21[-] * 0.7[-] = 871864.14[-]$$

El cual cumple la siguiente condición:

$$10^4 < 871864.14 < 10^7 \quad (4.18)$$

Por lo cual el número de Nusselt para esta geometría queda definido como:

$$Nu = 0.54 * Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (4.19)$$

Al igual que en la sección 4.3.7, se conoce que el flujo de calor por conducción en la tapa superior es igual al flujo de calor por convección en esta

$$\dot{Q}_{Conducción} = \dot{Q}_{Convección}$$

Se realizarán 30 iteraciones para determinar la temperatura de superficie en esta, con tal de luego tener todos los datos para poder calcular las pérdidas de calor por convección.

$$\frac{T_i - T_s}{\frac{e_{ac}}{A_t * k_{ac}} + \frac{e_{ais}}{A_t * k_{ais}}} = \frac{0.54 * k_{air}}{L_c} * \left(\frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{(\upsilon)^2} * \frac{\mu * C_p}{k_{air}}\right)^{\left(\frac{1}{4}\right)} * A_t * (T_s - T_\infty) \quad (4.20)$$

Se mantienen los siguientes valores de la sección 4.2.5

- $Ti = 308[K]$
- $Ts: Por\ determinar$
- $k_{ac} = 16.3[\frac{w}{m*K}]$
- $k_{ais} = 0.03[\frac{w}{m*K}]$
- $k_{air} = 0.026[\frac{w}{m*K}]$
- $g = 9.8[\frac{m}{s^2}]$
- $\beta = \frac{1}{T_\infty}$
- $T_\infty = temperatura\ ambiente\ dependiendo\ del\ dia$
- $\mu = 0.000018[\frac{Kg}{s*m}]$

- $C_p = 1012[\frac{J}{Kg*K}]$
- $\nu = 15.1 * 10^{-6}[\frac{m^2}{s}]$

Y se agregan los siguientes:

- $e_{ac}: espesor\ acero = 0.002[m]$
- $e_{ais}: espesor\ aislante = 0.05[m]$
- $A_t: area\ tapa = 0.1412[m^2]$
- $L_c: longitud\ carecteristica = {}^{Area}/_{Perimetro} = {}^{0.1412}/_{1.332} = 0.1060[m]$

Reemplazando los valores conocidos se llega a la siguiente expresión

$$0.0847 * (308 - T_s) = 0.0187 * (T_s - T_\infty) * \left(35833383.44 * \frac{(T_s - T_\infty)}{T_\infty}\right)^{\left(\frac{1}{4}\right)}$$

Y elevando a la cuarta potencia

$$5.146 * 10^{-5}[-] * (308[K] - T_s)^4 = 1.222 * 10^{-7}[-] * (T_s - T_\infty)^4 * \left(35833383.44[-] * \frac{(T_s - T_\infty)}{T_\infty}\right) \quad (4.21)$$

La expresión 4.21 será resuelta mediante un código en Python para obtener la temperatura de superficie promedio en cada iteración, teniendo como parámetros de entrada la temperatura ambiente asociada a cada día. Los resultados se muestran en la tabla 4-6.

Tabla 4-6:Temperatura promedio de superficie de la tapa superior (Fuente: elaboración propia)

Dia	Temperatura [K]	Dia	Temperatura [K]	Dia	Temperatura [K]
01-jun	289,82	**11-jun**	288,07	**21-jun**	289,82
02-jun	287,20	**12-jun**	288,95	**22-jun**	288,07
03-jun	287,20	**13-jun**	290,69	**23-jun**	288,07
04-jun	287,20	**14-jun**	288,07	**24-jun**	287,20
05-jun	288,07	**15-jun**	288,95	**25-jun**	288,95
06-jun	286,32	**16-jun**	288,95	**26-jun**	288,07
07-jun	287,20	**17-jun**	287,20	**27-jun**	288,07
08-jun	288,07	**18-jun**	287,20	**28-jun**	288,07
09-jun	289,82	**19-jun**	288,95	**29-jun**	288,07
10-jun	287,20	**20-jun**	288,95	**30-jun**	288,95

4.3.8.2 Tapa inferior

El procedimiento es idéntico que, para la tapa superior, solamente cambia el número de Nusselt. Por lo cual, repitiendo el proceso, lo primero es calcular el número de Grashof tomando las mismas condiciones referenciales que en la sección 4.3.6, es decir, una temperatura de superficie de 22 grados Celsius.

$$Gr_L = \frac{9.8\left[\frac{m}{s^2}\right] * (295[K] - 288[K]) * (0.106[m])^3}{288[K] * (15.1 * 10^{-6}\left[\frac{m^2}{2}\right])^2} = 1244426.21[-]$$

El valor del número de Prandtl se mantiene igual que en la sección 4.3.6.

$$Pr = \frac{0.0018[\frac{Kg}{s * m}] * 1012\left[\frac{J}{Kg * K}\right]}{0.026[\frac{w}{m * K}]} = 0.7[-]$$

Por lo cual el valor del número de Rayleigh es:

$$Ra_L = Gr_L * Pr = 1244426.21[-] * 0.7[-] = 871864.14[-]$$

El cual cumple la siguiente condición:

$$10^5 < 871864.14 < 10^{11} \quad (4.22)$$

Por lo cual el número de Nusselt para esta geometría queda definido como:

$$Nu = 0.27 * Ra_L^{1/4} \quad (4.23)$$

Al igual que en la sección 4.3.7, se conoce que el flujo de calor por conducción en la tapa superior es igual al flujo de calor por convección en esta

$$\dot{Q}_{Conducción} = \dot{Q}_{Convección}$$

Se realizarán 30 iteraciones para determinar la temperatura de superficie en esta, con tal de luego tener todos los datos para poder calcular las pérdidas de calor por convección.

$$\frac{T_i - T_s}{\frac{e_{ac}}{A_t * k_{ac}} + \frac{e_{ais}}{A_t * k_{ais}}} = \frac{0.27 * k_{air}}{L_c} * \left(\frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{(\upsilon)^2} * \frac{\mu * C_p}{k_{air}}\right)^{\left(\frac{1}{4}\right)} * A_t * (T_s - T_\infty) \quad (4.24)$$

Se mantienen los siguientes valores de la sección 4.3.7

- $Ti = 308[K]$
- $Ts: Por\ determinar$
- $k_{ac} = 16.3[\frac{w}{m*K}]$
- $k_{ais} = 0.03[\frac{w}{m*K}]$
- $k_{air} = 0.026[\frac{w}{m*K}]$
- $g = 9.8[\frac{m}{s^2}]$
- $\beta = \frac{1}{T_\infty}$
- $T_\infty = temperatura\ ambiente\ dependiendo\ del\ dia$
- $\mu = 0.000018[\frac{Kg}{s*m}]$
- $C_p = 1012[\frac{J}{Kg*K}]$
- $\nu = 15.1 * 10^{-6}[\frac{m^2}{s}]$

Y se agregan los siguientes:

- $e_{ac}: espesor\ acero = 0.002[m]$
- $e_{ais}: espesor\ aislante = 0.05[m]$
- $A_t: area\ tapa = 0.1412[m^2]$
- $L_c: longitud\ carecteristica = {}^{Area}/_{Perimetro} = {}^{0.1412}/_{1.332} = 0.1060[m]$

Reemplazando los valores conocidos se llega a la siguiente expresión

$$0.0847 * (308 - T_s) = 0.00935 * (T_s - T_\infty) * \left(35833383.44 * \frac{(T_s - T_\infty)}{T_\infty}\right)^{\left(\frac{1}{4}\right)}$$

Y elevando a la cuarta potencia

$$5.146 * 10^{-5} * (308 - T_s)^4 = 7.6465 * 10^{-9} * (T_s - T_\infty)^4 * \left(35833383.44 * \frac{(T_s - T_\infty)}{T_\infty}\right) \quad (4.25)$$

La expresión obtenida será resuelta mediante un código en Python para obtener la temperatura de superficie promedio en cada iteración, teniendo como parámetros de entrada la temperatura ambiente asociada a cada día. Los resultados se muestran en la tabla 4-7.

Tabla 4-7: Temperatura promedio de superficie sección inferior (Fuente: elaboración propia)

Dia	Temperatura [K]	Dia	Temperatura[K]	Dia	Temperatura[K]
01-jun	291,48	**11-jun**	289,89	**21-jun**	291,48
02-jun	289,09	**12-jun**	290,68	**22-jun**	289,89
03-jun	289,09	**13-jun**	292,27	**23-jun**	289,89
04-jun	289,09	**14-jun**	289,89	**24-jun**	289,09
05-jun	289,89	**15-jun**	290,68	**25-jun**	290,68
06-jun	288,29	**16-jun**	290,68	**26-jun**	289,89
07-jun	289,09	**17-jun**	289,09	**27-jun**	289,89
08-jun	289,89	**18-jun**	289,09	**28-jun**	289,89
09-jun	291,48	**19-jun**	290,68	**29-jun**	289,89
10-jun	289,09	**20-jun**	290,68	**30-jun**	290,68

4.3.9 Perdidas de calor totales por convección

Al sumar las pérdidas de calor por cada superficie y dejando estas en base diaria se obtienen los resultados presentados en la tabla 4-8.

Tabla 4-8: Perdidas de calor por todas las superficies del equipo biodigestor (Fuente: elaboración propia)

Dia	Calor [kJ]	Dia	Calor [kJ]	Dia	Calor [kJ]
01-jun	341,29	**11-jun**	380,59	**21-jun**	341,29
02-jun	400,45	**12-jun**	360,87	**22-jun**	380,59
03-jun	400,45	**13-jun**	321,86	**23-jun**	380,59
04-jun	400,45	**14-jun**	380,59	**24-jun**	400,45
05-jun	380,59	**15-jun**	360,87	**25-jun**	360,87
06-jun	420,45	**16-jun**	360,87	**26-jun**	380,59
07-jun	400,45	**17-jun**	400,45	**27-jun**	380,59
08-jun	380,59	**18-jun**	400,45	**28-jun**	380,59
09-jun	341,29	**19-jun**	360,87	**29-jun**	380,59
10-jun	400,45	**20-jun**	360,87	**30-jun**	360,87

4.3.10 Calor necesario para elevar la biomasa entrante a condiciones de operación

En esta sección se determinará el valor de $Q_{m.in}$ y $Q_{m.out}$ nombrados en el balance de masa del punto 4.3.2 para las 3 simulaciones de biodigestión realizadas en este trabajo con tal de determinar en cuál de estas se requiere más calor, para así poder dimensionar el sistema solar fotovoltaico en el caso más desfavorable posible.

La cantidad de calor transportado por la masa saliente viene dada por la expresión:

$$Q_{m.out} = m_{out} * c_{p.mezcla} * T_i \quad (4.26)$$

Del mismo modo, la masa entrante tiene un calor asociado determinado por:

$$Q_{m.in} = m_{in} * c_{p.mezcla} * T_\infty \quad (4.27)$$

Del balance de masa de la sección 4.3.2. se recuerda que:

$$m_{out} = m_{in}$$

Por lo tanto, al sumar estos términos y reemplazar el valor de masa saliente, se obtiene el calor total que es necesario agregar para elevar la biomasa entrante a condiciones de operación. Lo cual queda expresado como:

$$Q_{m.out} - Q_{m.in} = m_{in} * c_{p.mezcla} * (T_i - T_\infty) \quad (4.28)$$

Considerando que la masa entrante es una mezcla compuesta por agua y algas lo primero es determinar algún modo de calcular el calor especifico de la mezcla, o un cálculo análogo al cálculo presentado en la ecuación 4.28.

Teniendo en cuenta que por criterios de diseño se tiene la razón en volumen de la mezcla, la densidad y el calor especifico de cada componente, se puede calcular por separado el calor requerido por cada componente de la mezcla, siendo el calor total requerido la suma de estos.

Tabla 4-9: Calor especifico y densidad de los componentes de la biomasa entrante (Fuente: elaboración propia)

Componente	*Calor especifico [J/g* K]*	*Densidad [kg/m^3]*
Agua	4,182	997
Alga parda	1,5 [19]	1057,8

El calor requerido por el agua entrante tanto como por el alga queda expresado según las siguientes ecuaciones.

$$Q_{agua} = m_{agua} * C_{p,agua} * (T_i - T_\infty) \quad (4.29)$$

$$Q_{algas} = m_{algas} * C_{p,algas} * (T_i - T_\infty) \quad (4.30)$$

$$Q_{total} = Q_{agua} + Q_{algas} \quad (4.31)$$

Se presentan en la tabla 4-10 las condiciones de operación para las 3 simulaciones

Tabla 4-10: condiciones de operación para las simulaciones computacionales de biodigestión (Fuente: elaboración propia)

Simulación	**Dilución alga-agua**	**Caudal [L/d]**	**TRH [d]**	**SV mezcla [g SV/L]**
1	1/8	1,3	20,4	8,4
2	1/6	1	27,2	11,2
3	1/6	1,4	19,4	11,2

Se presenta en las tablas 4-11,4-12 y 4-13 el calor requerido para elevar la temperatura de la biomasa entrante a condiciones de operación para cada simulación durante el mes de junio.

Tabla 4-11: Calor requerido para elevar la temperatura de biomasa entrante a condiciones de operación en simulación 1 (Fuente: elaboración propia)

Dia	Calor [kJ]	Dia	Calor [kJ]	Dia	Calor [kJ]
01-jun	105,31	**11-jun**	115,34	**21-jun**	105,31
02-jun	120,36	**12-jun**	110,33	**22-jun**	115,34
03-jun	120,36	**13-jun**	100,30	**23-jun**	115,34
04-jun	120,36	**14-jun**	115,34	**24-jun**	120,36
05-jun	115,34	**15-jun**	110,33	**25-jun**	110,33
06-jun	125,37	**16-jun**	110,33	**26-jun**	115,34
07-jun	120,36	**17-jun**	120,36	**27-jun**	115,34
08-jun	115,34	**18-jun**	120,36	**28-jun**	115,34
09-jun	105,31	**19-jun**	110,33	**29-jun**	115,34
10-jun	120,36	**20-jun**	110,33	**30-jun**	110,33

Tabla 4-12: Calor requerido para elevar la temperatura de biomasa entrante a condiciones de operación en simulación 2 (Fuente: elaboración propia)

Dia	Calor [kJ]	Dia	Calor [kJ]	Dia	Calor [kJ]
01-jun	78,74	**11-jun**	86,24	**21-jun**	78,74
02-jun	89,99	**12-jun**	82,49	**22-jun**	86,24
03-jun	89,99	**13-jun**	74,99	**23-jun**	86,24
04-jun	89,99	**14-jun**	86,24	**24-jun**	89,99
05-jun	86,24	**15-jun**	82,49	**25-jun**	82,49
06-jun	93,74	**16-jun**	82,49	**26-jun**	86,24
07-jun	89,99	**17-jun**	89,99	**27-jun**	86,24
08-jun	86,24	**18-jun**	89,99	**28-jun**	86,24
09-jun	78,74	**19-jun**	82,49	**29-jun**	86,24
10-jun	89,99	**20-jun**	82,49	**30-jun**	82,49

Tabla 4-13:Calor requerido para elevar la temperatura de biomasa entrante a condiciones de operación en simulación 3 (Fuente: elaboración propia)

Dia	Calor [kJ]	Dia	Calor [kJ]	Dia	Calor [kJ]
01-jun	110,23	**11-jun**	120,73	**21-jun**	110,23
02-jun	125,98	**12-jun**	115,48	**22-jun**	120,73
03-jun	125,98	**13-jun**	104,98	**23-jun**	120,73
04-jun	125,98	**14-jun**	120,73	**24-jun**	125,98
05-jun	120,73	**15-jun**	115,48	**25-jun**	115,48
06-jun	**131,23**	**16-jun**	115,48	**26-jun**	120,73
07-jun	125,98	**17-jun**	125,98	**27-jun**	120,73
08-jun	120,73	**18-jun**	125,98	**28-jun**	120,73
09-jun	110,23	**19-jun**	115,48	**29-jun**	120,73
10-jun	125,98	**20-jun**	115,48	**30-jun**	115,48

Se aprecia que el día 06 de junio para la simulación 3 es donde se requiere ceder una mayor cantidad de calor a la biomasa entrante, siendo este una cantidad de 131,23 kilo Joules, por lo cual se diseñara el sistema fotovoltaico con los datos de calor requerido por la biomasa entrante en la simulación 3.

4.4 DIMENSIONAMIENTO Y DISEÑO DEL ESTANQUE CON AGITADOR. [7]

El objetivo de esta sección es corroborar que las medidas presentadas en la sección anterior cumplan con los estándares de diseño para estanques con agitador, con tal que el proceso de biodigestión anaerobia se pueda realizar correctamente.

Se definirá el tipo de flujo dentro del equipo, que tipo de impulsor será usado en el agitador, que dimensiones tendrá este, la potencia requerida para su correcto funcionamiento y el motor acoplado a este sistema motriz.

4.4.1 Tipo de impulsor

Con tal de mantener un régimen de agitación tanto axial como radial se decide utilizar palas planas inclinadas 45°. Esta decisión de basa en disminuir los costos y mantener la simplicidad del diseño.

Este tipo de impulsor genera el flujo deseado para cualquier Reynolds y proporcionan alta velocidad tangencial, aunque baja capacidad de impulsión, lo cual es lo deseado en este estudio. Giran sobre un eje vertical y cumplen eficazmente problemas sencillos de agitación. Las corrientes generadas suelen impulsarse desde el centro del impulsor hacia las paredes y luego hacia arriba o hacia abajo.

A velocidades bajas los agitadores de palas generan una agitación muy suave en estanques sin placas deflectoras.

4.4.2 Condiciones de operación deseadas

La agitación de estanques puede ser utilizada para diversos fines, en este estudio se desean los siguientes:

- Suspensión de un sólido en un líquido: con tal de mantener la mezcla agua-alga lo más homogénea posible, es deseado que el sustrato solido se encuentre en suspensión.

- Intercambio térmico entre un fluido y una pared: el movimiento del fluido por la superficie interna del biodigestor mejora la razón de transferencia de calor desde el estanque exterior, además de homogeneizar la temperatura de la mezcla.

- Digestión anaerobia: ya que en este trabajo se estudia un proceso biológico dentro del estanque, la agitación permite asegurar una suspensión homogénea de los microorganismos en el medio que contiene los nutrientes.

4.4.3 Flujos

Según el tipo de pala elegida anteriormente, se puede deducir que en este caso tendremos una combinación de los 3 tipos de flujo existentes, axial, radial y tangencial. Estos se muestran en la ilustración 4-7.

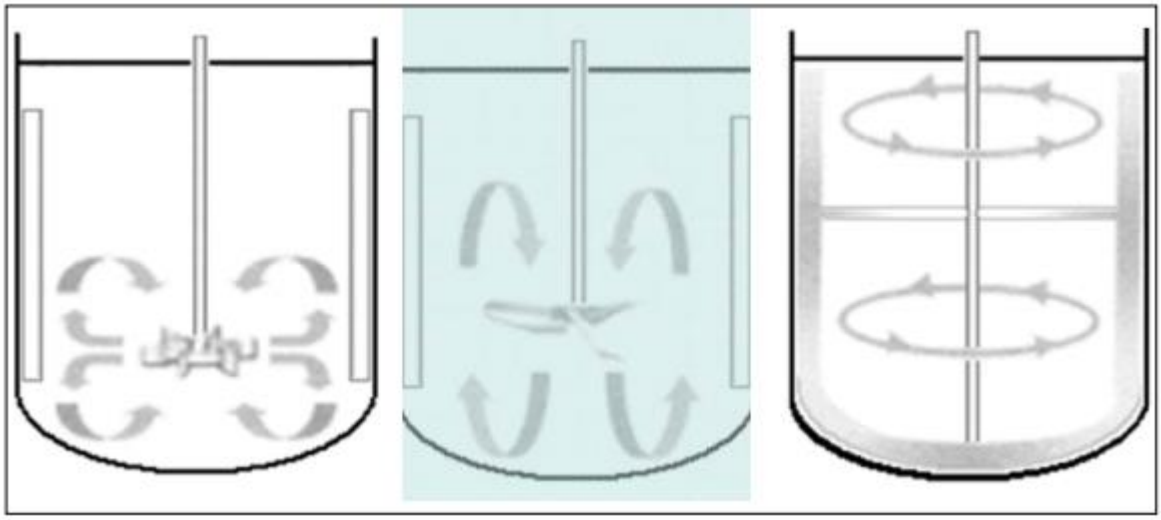


Ilustración 4-7: representación de flujos radial, axial y tangencial. (Fuente: [7])

4.4.4 Cálculos de dimensiones.

En la tabla 4-14 se presentan los parámetros de entrada para el diseño

Tabla 4-14: Datos de entrada para el diseño de un agitador de fluidos (Fuente: elaboración propia)

Fluido a agitar	Mezcla de agua con algas
Densidad del fluido	1000 [Kg/m^3]
Viscosidad máxima	0.001[Pa*s]
Presión de operación	Presión atmosférica
Temperatura de trabajo	35°C
Diámetro del estanque	320 [mm]
Altura del estanque	410 [mm]
Tapa estanque	Plana
Fondo	Plano
Altura de relleno	372,6 [mm]
Volumen de llenado	0,030 [m^3]

Como punto de partida en el diseño de un agitador se pueden utilizar las semejanzas geométricas estandarizadas que relacionan las medidas generales del estanque con el tipo de impulsor.

Se muestran a continuación las semejanzas geométricas para un estanque de agitación tipo palas inclinadas.

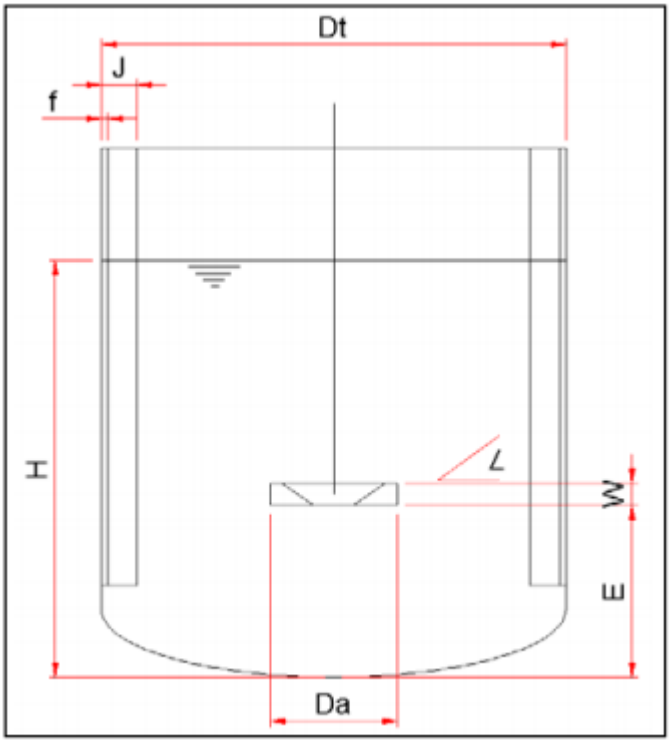


Ilustración 4-8: semejanzas geométricas impulsor tipo palas inclinadas (Fuente: [7])

- $\frac{Da}{Dt} = 0.337[-]$ (5.32)
- $\frac{E}{Dt} = \frac{0.17}{0.34}[-]$ (5.33)

De las relaciones presentadas se pueden obtener los siguientes valores de parámetro

$$Da = 0.337 * Dt = 0.337 * 0.32[m] = 0.1078\ [m] \quad (4.34)$$

$$E = \frac{0.17}{0.34} * Dt = \frac{0.17}{0.34} * Dt = \frac{0.17}{0.34} * 0.32[m] = 0.16[m] \quad (4.35)$$

4.4.5 Cálculo de potencia en el agitador

Para que el proceso de agitación sea eficaz, el volumen del fluido agitado debe ser capaz de llegar hasta las partes más lejanas del estanque, donde la velocidad de circulación no es el único factor importante, sino que la turbulencia del fluido puede llegar a determinar la eficacia de la operación.

Se puede conocer la potencia consumida por el agitador a través de números adimensionales, relacionando por medio de gráficos el número de Reynolds y el número de potencia.

Primero se calcula el número de Reynolds, considerando que la velocidad de agitación serán 200 [RPM]

$$Re = \frac{N * Da^2 * \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{3.33[rps] * 0.1078^2[m] * 1000\left[\frac{kg}{m^3}\right]}{0.001\ [\frac{kg}{m^2 * s^2} * s]} = 38.697{,}4[-] \quad (4.36)$$

Según el valor obtenido se determina que el régimen del flujo es turbulento ya que se encuentra en dentro del siguiente intervalo.

$$Re > 10.000$$

El número de potencia es proporcional a la relación entre la fuerza de rozamiento que actúa sobre una unidad de área del impulsor y la fuerza de inercia. Cuando existe régimen turbulento el número de potencia tiene un valor constante.

$$Np = \frac{P}{N^3 * Da^5 * \rho} \quad (4.37)$$

El siguiente grafico de Re v/s Np se utiliza para estimar la potencia del impulsor. La curva A se utiliza para palas verticales de impulsor, la curva B y C para palas verticales y estrechas y la curva D para un estanque que no posee placas deflectoras.

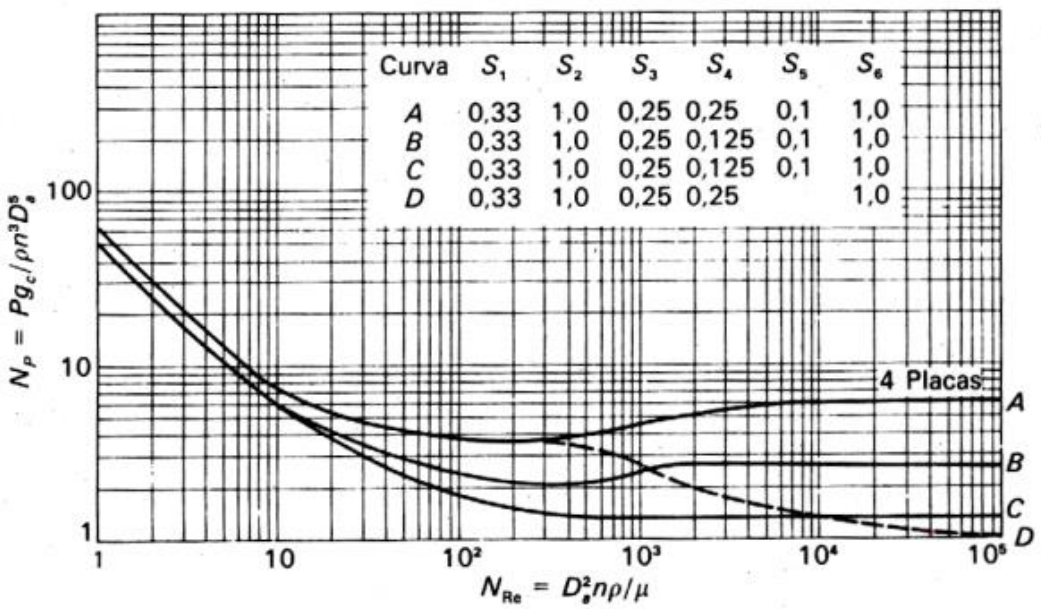


Ilustración 4-9: Numero de potencia frente a número de Reynolds (Fuente [7])

Utilizando la ilustración 4-9 intersectando el eje horizontal en un valor de Reynolds aproximado de 40.000 sobre la curva D con el eje vertical, se puede estimar que el número de potencia es aproximadamente 1,2. Ingresando este dato en la ecuación de numero de potencia mostrado anteriormente se procede a calcular la potencia utilizando la fórmula 4.37.

$$1.2 = \frac{P}{3.33^3 * 0.1078^5 * 1000}$$

$$P = 0.645\ [w]$$

Considerando una eficiencia de motor de 0.7 y que las perdidas por fricción son del 35% se recalcula la potencia requerida.

$$P = \frac{0.6431 * 1.35}{0.7} = 1.24\ [w] = 0{,}0016\ [HP] \quad (4.38)$$

Por lo cual la potencia de motor requerida es de 1,24 watts o 0,0016 caballos de fuerza.

4.4.6 Selección de motor

Para seleccionar un motor es necesario saber tanto la potencia como el torque requerido. Previamente se calculó la potencia requerida. Por lo cual ahora se calculará el torque según la siguiente expresión.

$$T = \frac{7162000 * P}{N} = \frac{7162000 * 0{,}0016}{200} = 57{,}3[N * mm] \quad (4.38)$$

Por lo cual se decide sobredimensionar con tal de asegurar el funcionamiento de este y para que el equipo sea capaz de trabajar con fluidos de mayor densidad. Se utilizará un motor de 0,5 KW con la caja reductora correspondiente para mantener la rotación en el eje del agitador a 200 revoluciones por minuto.

Por lo cual, el consumo eléctrico diario de este motor funcionando 24 horas por día es de:

$$50 * 86{,}4 = 4320[KJ]$$

Este valor junto con la cantidad de calor que será necesario agregar el sistema serán los parámetros de entrada para el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico.

5 DIMENSIONAMIENTO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO [20]

5.1 ENERGÍA REQUERIDA POR EL SISTEMA

Para dimensionar un sistema eléctrico fotovoltaico, lo primero es determinar la cantidad de energía que será necesaria recolectar a través de este. En este caso tenemos que la energía a entregar por el sistema fotovoltaico será entregada al sistema biodigestor a través de dos mecanismos, el primero es una serie de resistencias eléctricas que entregara calor al fluido de la camisa térmica y el segundo un motor acoplado a un rotor, el cual mantendrá el fluido agitado.

Teniendo esto en cuenta y tomando en cuenta los cálculos realizados en la sección 5 se puede determinar la energía que es necesario que entreguen las resistencias eléctricas, la cual es la suma de las pérdidas de calor por la superficie y la energía necesaria para elevar la biomasa entrante a condiciones de operación, esta información se presenta en la tabla 38.

Tabla 5-1:Calor que deben entregar las resistencias eléctricas a la camisa térmica del sistema biodigestor (Fuente: Elaboración propia)

Dia	Calor [kJ]	Dia	Calor [kJ]	Dia	Calor [kJ]
01-jun	451,53	**11-jun**	501,32	**21-jun**	451,53
02-jun	526,43	**12-jun**	476,35	**22-jun**	501,32
03-jun	526,43	**13-jun**	426,85	**23-jun**	501,32
04-jun	526,43	**14-jun**	501,32	**24-jun**	526,43
05-jun	501,32	**15-jun**	476,35	**25-jun**	476,35
06-jun	551,68	**16-jun**	476,35	**26-jun**	501,32
07-jun	526,43	**17-jun**	526,43	**27-jun**	501,32
08-jun	501,32	**18-jun**	526,43	**28-jun**	501,32
09-jun	451,53	**19-jun**	476,35	**29-jun**	501,32
10-jun	526,43	**20-jun**	476,35	**30-jun**	476,35

De la tabla 6-1 se aprecia que el día 06 de junio es el día en que se requiere mayor inyección de energía al sistema, debiendo entregar aproximadamente 551,68 KJ de energía, sumando a esto la energía requerida por el motor eléctrico se obtiene que el consumo diario de energía máximo para el equipo es:

$$E_{total\ diaria} = E_{motor} + Q_{calor} \quad (5.1)$$

$$E_{total\ diaria} = 4320[KJ] + 551{,}68[KJ] = 4871{,}68\ [KJ]$$

5.2 DIMENSIONAMIENTO

En este apartado se utilizará la guía de dimensionado de sistemas fotovoltaicos del máster en energías renovables y mercado energético de **Ciemat**.

El propósito del dimensionado del sistema fotovoltaico es determinar el número de módulos y baterías necesarias para suministrar de modo fiable un determinado consumo durante un año típico.

5.2.1 Descripción del método "amperios-hora"

Este método se basa en el cálculo del consumo diario en amperios-hora, teniendo en cuenta las perdidas entre la batería y las cargas y el rendimiento de carga de la batería. La batería se dimensiona teniendo en cuenta el número de días de autonomía. Para dimensionar el generador fotovoltaico son necesarios los datos de irradiación del lugar de la instalación. En el caso más normal se supone un consumo estacionario durante el año, en cuyo caso se necesitan los valores diarios medios en el plano del generador para el peor mes del año y el ángulo óptimo de inclinación.

La radiación diaria se considera como "horas pico", la cual corresponde a 1000 Wh/m^2.

5.2.1.1 Cálculo de los consumos diarios.

Se trata de obtener el consumo medio diario, en amperios-hora por día. Si este no es constante durante todo el año, se ha de calcular para cada mes. Se puede utilizar el voltaje de la batería, pero se ha de tener en cuenta el voltaje al que operan los equipos, incluyendo las caídas de tensión.

Si se utiliza un inversor se ha de tener en cuenta su rendimiento. El rendimiento puede ser diferente para distintos consumos.

Se busca confeccionar un listado de los diversos aparatos conectados al sistema, el número de horas de uso diario y el voltaje nominal de operación de cada uno.

La tensión nominal del sistema es normalmente la necesaria para las cargas más elevadas. Si predominan cargas AC, debe elegirse una tensión DC que sea compatible con la entrada del inversor.

5.2.1.2 Cálculo de la potencia pico y de la corriente

Este paso es necesario para el dimensionado de los equipos involucrados en el diseño del sistema fotovoltaico, de modo que estos puedan soportar la potencia pico. Consiste en sumar las potencias del consumo y dividirlo por el voltaje de la batería.

5.2.1.3 Corrección de consumo

Se utiliza un facto que toma en consideración el rendimiento de carga de la batería, y por tanto el consumo en amperio-hora obtenidos en el paso anterior se incrementan por este factor para dar un consumo corregido.

5.2.1.4 Corriente y ángulo de inclinación

Con este procedimiento de dimensionado existe un mes determinante para el diseño del sistema, que es el mes en que baja al mínimo la proporción de energía solar disponible y el consumo. Con este criterio, el sistema fotovoltaico se dimensiona para satisfacer dicho consumo en el peor mes del año. El ángulo de inclinación optimo es aquel que da la mayor radiación para el peor mes.

5.2.1.5 Dimensionado de la batería

La fórmula básica para calcular el tamaño de batería se obtiene multiplicando el número de días de autonomía por el consumo diario y dividido por la máxima profundidad de descarga

$$Capacidad\ de\ bateria = \frac{N°\ dias\ autonomia * consumo\ diario}{Maxima\ profundidad\ de\ descarga} \quad (5.2)$$

Para sistemas no críticos se recomiendan entre 2 y 5 días de autonomía, mientras que en sistemas críticos el número de días de autonomía puede tomar valores entre 5 y 10. Sin embargo es contraproducente tener una capacidad de batería muy grande si la potencia del generador fotovoltaico no es capaz de recargar dicha batería correctamente. Una de las limitaciones de este método de dimensionado es que no proporciona un método para calcular cuánto generador ha de ser sobredimensionado, y trata la fiabilidad del sistema únicamente en función de la capacidad de la batería.

El número de baterías conectada es determinado por el cociente entre el voltaje nominal de las cargas del consumo y el voltaje nominal de la batería.

El número de baterías conectada en paralelo es determinado por el cociente entre la capacidad necesaria de batería y la capacidad nominal de una sola batería.

Otro factor que se ha de considerar es el ajuste de la máxima profundidad de descarga para prevenir la congelación de los electrolitos en climas muy fríos. En climas muy fríos, si se permite que la batería se descargue demasiado el electrolito podría congelarse dañando irreversiblemente a batería.

5.2.1.6 Dimensionado del generador

El dimensionado de la batería se ha realizado en base al número de días de autonomía. El dimensionado del generador fotovoltaico se basa en suministrar el consumo medio diario.

En primer lugar, se determina el ángulo óptimo de inclinación del generador fotovoltaico como aquel en el que se obtiene la mayor radiación en el peor mes del año.

Se introduce un factor de corrección del módulo que tiene en cuenta que los módulos operan en condiciones diferentes de las nominales.

El número de módulos en paralelo se obtiene como el cociente entre la corriente de diseño y la corriente del módulo en el punto de máxima potencia en condiciones estándar de medida. Si el número obtenido no es un número entero como norma general se recomienda redondear al entero superior si la aplicación es crítica, en caso contrario al entero inferior.

El número de módulos en serie se obtiene del cociente entre el voltaje nominal del sistema y el voltaje nominal del módulo.

5.2.1.7 Controladores de carga

Los controladores de carga se incluyen en los sistemas fotovoltaicos para proteger las baterías contra sobrecargas y descargas excesivas. La mayoría de los controladores detectan la tensión de batería y actúan de acuerdo con los niveles de tensión. Algunos también poseen sensores de temperatura para compensar el efecto de la temperatura sobre la tensión de la batería y su estado de carga. El controlador debe tener suficiente capacidad para controlar la máxima corriente del sistema. Se recomienda incluir un factor de seguridad de 1.25 respecto de la corriente de cortocircuito del generador para acomodar la corriente excesiva causada por el aumento de irradiancia que a veces producen las nubes durante cortos periodos de tiempo.

5.2.1.8 Inversor

La selección del inversor viene dada por el suministro de la potencia de los consumos AC que operan de modo continuado y por el suministro de los picos de demanda. Las cargas inductivas como motores y compresores poseen bobinas que se deben cargar. Durante un corto periodo de arranque la corriente demandada puede aumentar de 4 a 6 veces el valor de la operación continuada. Por tanto, el inversor elegido debe ser capaz de suministrar estos picos de corriente de arranque

5.2.2 Aplicación del método ampere-hora

5.2.2.1 Cálculo de consumo

Se determino en la sección 6.1 que, en las condiciones ambientales más desfavorables, las resistencias eléctricas deben entregar al sistema 551,68 [KJ] durante un día, lo que implica 22,986[KJ] en promedio cada hora. En base a este dato se procede a calcular el tiempo de funcionamiento de estas resistencias cada día, teniendo en cuenta que se usaran 3 resistencias eléctricas de 25 [W] distanciadas de forma equidistante para que el calor se transfiera de forma más eficiente dentro del fluido. Entonces, la cantidad de horas diarias que se usaran las resistencias eléctricas son:

$$3[un] * 25[W] * t\left[\frac{s}{h}\right] = 22.986[J] \quad (5.3)$$

$$t = 306\left[\frac{s}{h}\right] = 0{,}0085\left[\frac{h}{h}\right] = 2{,}04\left[\frac{h}{dia}\right] \quad (5.4)$$

Debido a que el sistema se planea construir conectado a la red eléctrica, se considera la mitad de la potencia de los instrumentos conectados a él para dimensionar el sistema fotovoltaico de forma más precisa a la realidad de los meses del año exceptuando el peor.

5.2.3 Consumo eléctrico

Tabla 5-2: tablas de consumo eléctrico (Fuente, elaboración propia)

Descripción	N°		Corriente [A]		Voltaje [V]		Potencia AC[W]
Motor	1	x	0,22	x	220	=	50
R. Eléctrica	3	x	0,34	x	220	=	75

Potencia AC[W]		Ciclo diario (horas /día)		Ciclo semanal (días/semana)		Rendimiento de conversión		Voltaje nominal sistema [V]		Consumo amp-hora (Ah/día)
25	x	24	x	7÷7	÷	0,8	÷	12	=	62,5
37,5	x	2,04	x	7÷7	÷	0,98	÷	12	=	7,96
=										=
62,5										70,46

Potencia AC total [W]		Voltaje nominal sistema		Corriente pico [A]
125	÷	12	=	10,41

Consumo total A-h [W]		Factor de rendimiento cableado		Factor de rendimiento batería		Consumo total Ah corregido (Ah/Día)
70,46	÷	0,98	÷	0,9	=	79,88

Parámetros de diseño

- Rendimiento de conversión DC/AC = 0,80
- Factor de rendimiento de cableado por defecto = 0,98
- Factor de rendimiento de batería por defecto = 0,9

5.2.4 Corriente y ángulo de inclinación

Mediante el explorador solar ofrecido por la página web del ministerio de energía de chile se determina que el ángulo de inclinación óptimo para el peor mes (junio) es de 29 grados. Mediante la misma herramienta se determina que las horas sol pico para este mes son 3,6.

Tabla 5-3: Corriente y ángulo de inclinación (Fuente: elaboración propia)

Ángulo de inclinación				29°
Consumo corregido (Ah/Día)		**Horas sol pico (hrs/día)**		**Corriente de diseño [A]**
79,88	÷	3,6	=	22,18

5.2.5 Dimensionado de la batería

Tabla 5-4: Información de las baterías (Fuente: elaboración propia)

Información de la batería	
Marca	Bosch
Modelo	S4 CCA 600
Tipo	Plomo-antimonio
Voltaje nominal [V]	12
Capacidad nominal [Ah]	70

Tabla 5-5: dimensionamiento de baterías (Fuente: elaboración propia)

Consumo total A-h corregido (Ah/Día)		Días de autonomía (Días)		Máxima profundidad de descarga		Corrección por temperatura		Capacidad necesaria batería (Ah)
81,88	x	3	÷	0,8	÷	0,9	=	332,8

Capacidad necesaria batería (Ah)		Capacidad de la batería seleccionada (Ah)		Baterías en paralelo
332,8	÷	70	=	4,75≈5

Voltaje nominal del sistema (V)		Voltaje nominal de la batería (V)		Baterías en serie		Baterías en paralelo		N° total de baterías
12	x	12	=	1	x	5	=	5

Baterías en paralelo		Capacidad de la batería seleccionada (Ah)		Capacidad del sistema de baterías (Ah)
5	x	70	=	350

Capacidad del sistema de baterías (Ah)		Factor de profundidad de descarga estacional		Capacidad útil (Ah)
350	x	0,25	=	87,5

Parámetros de diseño:

- Máxima profundidad de descarga batería plomo-antimonio = 0,8
- Valor por defecto para factor de corrección por temperatura = 0,9
- Valor por defecto para factor de profundidad de descarga estacional = 0,25

5.2.6 Dimensionado del generador fotovoltaico

Tabla 5-6: Información del módulo fotovoltaico (Fuente: elaboración propia)

Información del módulo fotovoltaico					
Modelo	JX-60M	**Voltios nominales (V)**	12		
Largo (mm)	620	**Alto (mm)**	670	**Ancho (mm)**	30
Peso (Kg)	5,4	**Diodo Bypass**	Si		
Voltaje (V)	**STC**	**Voc**			
	18	21,78			
Corriente (A)	**STC**	**Isc**			
	3,33	3,57			

Tabla 5-7: dimensionamientos generadores fotovoltaicos (Fuente: elaboración propia)

Capacidad útil (A)		**Horas sol pico máximo (h/Día)**		**Días consecutivos estacionales sol mínimo (Días)**		**Reducción estacional de corriente (A)**
87,5	÷	3,6	÷	45,0	=	0,54

Corriente de diseño (A)		**Reducción estacional de corriente (A)**		**Corriente corregida (A)**
22,18	-	0,54	=	21,64

Corriente corregida (A)		**Factor de corrección del modulo**		**Corriente diseño corregida (A)**		**Corriente nominal del módulo (A)**		**Módulos en paralelo**
21,64	x	0,9	=	19,47	÷	3,33	÷	5,84≈6

Tensión nominal sistema (V)		Tensión nominal del módulo (V)		Módulos en serie		Módulos en paralelo		Total módulos
12	÷	12	=	1	x	6	=	6

Parámetros de diseño

- Valor por defecto para el número de días consecutivos de sol mínimo = 45
- Factor de corrección modulo cristalino = 0,9

5.2.7 Especificaciones generador fotovoltaico

Tabla 5-8: Especificaciones generador fotovoltaico (Fuente: elaboración propia)

Corriente nominal módulo		Módulos en paralelo		Corriente nominal generador (A)
3,33	x	6	=	20
Isc módulo (A)		**Módulos en paralelo**		**Isc del generador (A)**
3,57	x	6	=	21,42
Voltaje nominal módulo (V)		**Módulos en serie**		**Voltaje nominal generador (V)**
12	x	1	=	12
Voc módulo (V)		**Módulos en serie**		**Voc generador (V)**
21,78	x	1	=	21,78

5.2.8 Regulador de carga

Tabla 5-9: información regulador de carga (Fuente: elaboración propia)

Información regulador de carga	
Modelo	XTRA 3120N
Tipo	Serie multietapa
Voltaje (V)	12-24
Corriente máxima de batería (A)	30
Eficiencia peak	98%
Compensación de temperatura	Si
Voltaje corte sobrecarga	Si
Voltaje corte sobre descarga	Si
Voltaje rearme sobrecarga	Si
Seguidor MPP	Si
Protección corriente inversa	Si

Tabla 5-10: regulador de carga (Fuente: elaboración propia)

		Isc del generador (A)		Corriente mínima del regulador (A)		Corriente nominal regulador (A)		Reguladores en paralelo
1,25	x	21,42	=	26,775	÷	30	=	1

5.2.8.1 Inversor

Tabla 5-11: Requerimientos del inversor (Fuente: elaboración propia)

Requerimientos del sistema	
Forma de onda	Senoidal
Voltaje DC (V)	12
Voltaje AC (V)	220
Potencia máxima (W)	2000
Potencia nominal (W)	1000
Tiempo de operación en sobrecarga (s)	2
Régimen de servicio continuo (W)	1000

Tabla 5-12: especificaciones Inversor (Fuente: elaboración propia)

Especificaciones del inversor	
Marca	Truepower
Modelo	KS-1000-212
Forma de onda	Senoidal
Voltaje DC (W)	12
Voltaje AC (W)	220
Potencia máxima (W)	2000

5.3 RESUMEN COMPONENTES SISTEMA FOTOVOLTAICO

A partir de los cálculos realizados en el punto 5.2 se elabora un listado de los componentes del sistema fotovoltaico.

- 5 baterías Bosch 70 Ah S4 CCA 600
- 6 módulos solares JX-60M
- 1 regulador de carga XTRA 3210N
- 1 inversor Truepower KS-1000-212

Las fichas técnicas de estos equipos de adjuntan en el anexo 1.

6 SIMULACIONES COMPUTACIONALES EN ADM1

El modelo número 1 de digestión anaeróbica IWA (ADM1) es un modelo estructurado que describe los procesos principales involucrados en la digestión anaeróbica para convertir substratos orgánicos complejos en biogás: desintegración, hidrolisis, acidogénesis (o fermentación), acetogénesis y metanogénesis. El modelo define variables de estado para describir el comportamiento de componentes particulados y solubles a través de la ruta de reacción e incluye 7 grupos de bacterias degradadoras, clasificadas por sus funciones: degradadoras de azucares, aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga, valeratos y butiratos, propionatos, acetados e hidrogeno. Todas las especies orgánicas e hidrogeno molecular son descritos en términos de demanda química de oxígeno, mientras que las especies como carbón inorgánico o nitrógeno inorgánico son descritas en base molar.

En este trabajo se utilizó una versión modificada del ADM1, el cual incorpora substratos solubles fermentables dentro del modelo para extender este para aplicaciones de co-digestion anaeróbica tanto para procesos continuos como de lote. El modelo fue implementado en una plataforma Excel-Matlab/Simulink. El modelo calcula el flujo de mezcla y la composición del afluente hacia el digestor. Las ecuaciones diferenciales ordinarias que rigen los fenómenos químicos fueron codificadas utilizando Matlab e integradas con el resolucionador ODE113.

6.1 SIMULACIONES

Se realizaron 4 simulaciones de biodigestión anaerobia para el alga Durvillaea Antárctica, una en lote para calibrar el modelo en base a los resultados BMP experimentales descritos en la sección 4 y tres más en régimen continuo de flujo estacionario para determinar la biodegradabilidad y la tasa de conversión a metano del alga. Todas ellas fueron simuladas bajo las siguientes condiciones:

- Al interior de equipo biodigestor la temperatura es de 35°C perfectamente mezclada.

- La duración de la simulación fue de 75 días.
- La biomasa presenta la misma composición durante toda la duración del ensayo.

Se presentan en la tabla 55 los parámetros de entrada para las simulaciones de biodigestión del alga Durvillaea Antárctica en continuo.

Tabla 6-1: parámetros de entrada para simulaciones de biodigestión (Fuente: elaboración propia)

Simulación	VCO [g*COD/L*d]	TRH [d]	SV mezcla [g*SV/L]	COD alga [g*COD/L]	Caudal [L/d]	dilución
1	0,5	20,4	8,4	10,2	1,3	1/8
2	0,5	27,2	11,2	13,6	1	1/6
3	0,7	19,4	11,2	13,6	1,4	1/6

6.2 RESULTADOS

6.2.1 Simulación 1

Se simulo un ensayo de digestión anaeróbica durante 75 días con los parámetros de entrada estipulados en la tabla 6-1 para la simulación 1, obteniendo los siguientes resultados:

Durante los primeros 15 dias se obtuvo un caudal de gas aproximadamente de 4 litros por dia, este a contar del dia 30 en adelante se estuvo estable cerca de los 3,6 litros por dia. Esta situacion se muestra en ilustración 6-1.

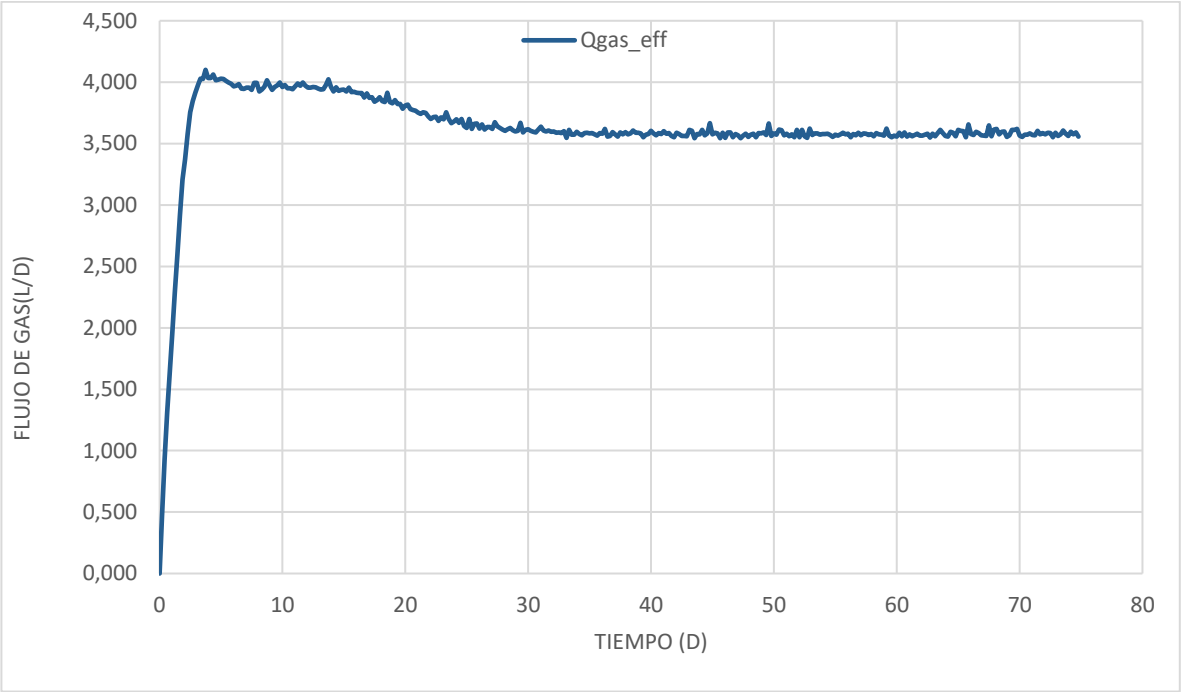


Ilustración 6-1: Flujo de biogás para simulación uno (Fuente: elaboración propia)

La presión parcial de los gases generados se presenta en la ilustración 6-2. A partir del día 15 en adelante se observa que los valores se mantienen constantes, siendo la presión parcial del metano 0,6 y la del dióxido de carbono 0,4. Lo cual representa el porcentaje en volumen de cada especie.

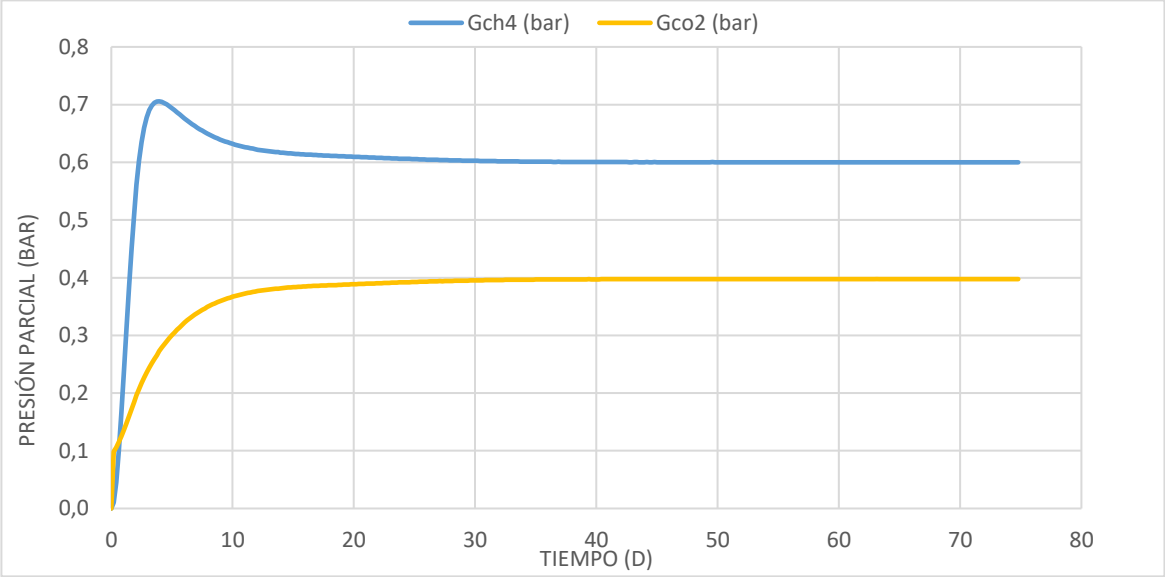


Ilustración 6-2: Presión parcial de las especies presentes en el biogás generado en simulación uno (Fuente: elaboración propia)

A partir de los gráficos presentados y datos de las simulaciones se puede determinar la cantidad de mililitros de metano generados por cada gramo de solidos volátiles ingresado al equipo digestor.

- $Q_{gas} = 3{,}6 \left[\frac{L}{d}\right]$
- $Q_{CH4} = Q_{gas} * 0{,}6 = 2{,}16 \left[\frac{L\ CH4}{d}\right] = 2160 \left[\frac{ml\ CH4}{d}\right]$
- $SV_{mezcla} = 8{,}4 \left[\frac{g\ COD}{L}\right]$
- $Q_{biomasa\ entrante} = 1{,}3 \left[\frac{L}{d}\right]$
- $SV_{mezcla\ diarios} = SV_{mezcla} * Q_{biomasa\ entrante} = 10{,}92 \left[\frac{gCOD}{d}\right]$
- $Rendimiento\ metanogenico = {}^{Q_{CH4}}/_{SV_{mezcla\ diarios}} = 197{,}8 \left[\frac{ml\ CH4}{gCOD}\right]$

- Porcentaje de metano=60%
- Porcentaje de conversión a metano=42%
- Porcentaje de biodegradabilidad= 45%

6.2.2 Simulación 2

Se simulo un ensayo de digestión anaeróbica durante 75 días con los parámetros de entrada estipulados en la tabla 6-1 para la simulación 2, obteniendo los siguientes resultados:

Durante los primeros 15 dias se obtuvo un caudal de gas aproximadamente de 4,3 litros por dia, este a contar del dia 25 en adelante se estuvo estable cerca de los 3,75 litros por dia. Esta situacion se muestra en ilustración 6-3.

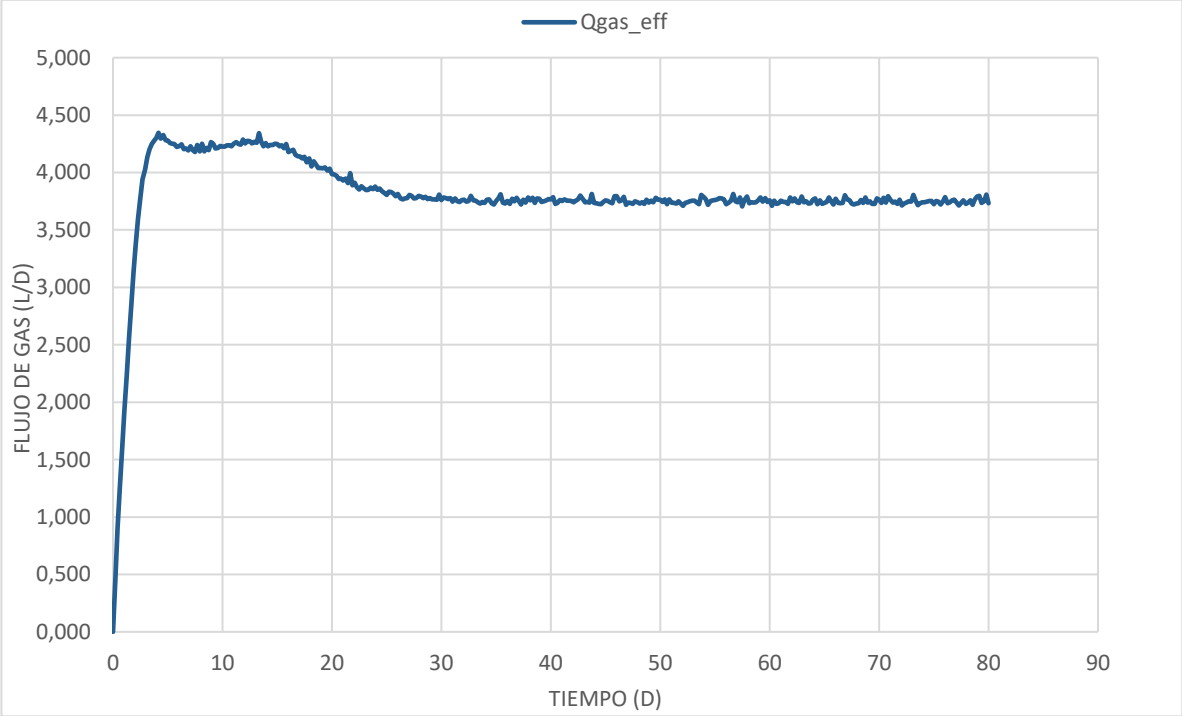


Ilustración 6-3: Flujo de biogás para simulación dos (Fuente: elaboración propia)

La presión parcial de los gases generados se presenta en la ilustración 6-4. A partir del día 15 en adelante se observa que los valores se mantienen constantes, siendo la presión parcial del metano de aproximadamente 0,59 y la del dióxido de carbono 0,41. Lo cual representa el porcentaje en volumen de cada especie.

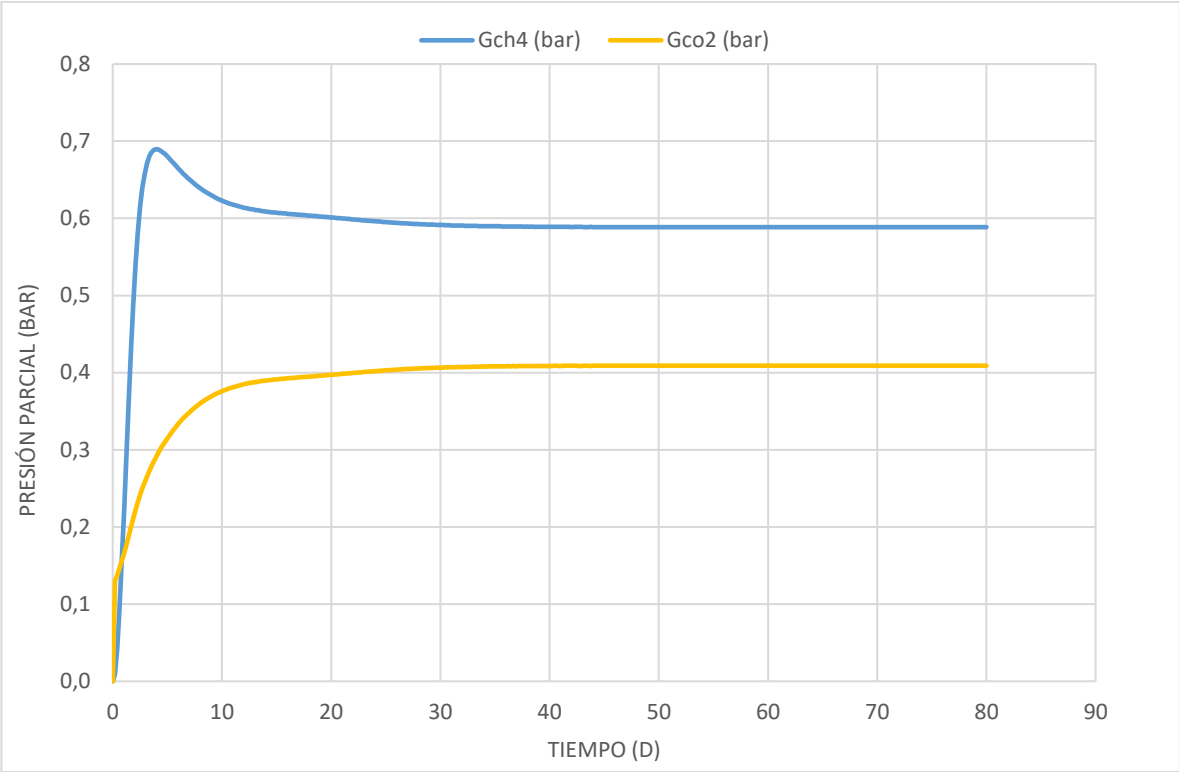


Ilustración 6-4: Presión parcial de las especies presentes en el biogás generado en simulación dos (Fuente: elaboración propia)

A partir de los gráficos presentados y datos de las simulaciones se puede determinar la cantidad de mililitros de metano generados por cada gramo de solidos volátiles ingresado al equipo digestor.

- $Q_{gas} = 3{,}75 \left[\frac{L}{d}\right]$
- $Q_{CH4} = Q_{gas} * 0{,}59 = 2{,}212 \left[\frac{L\ CH4}{d}\right] = 2.212 \left[\frac{ml\ CH4}{d}\right]$
- $SV_{mezcla} = 11{,}2 \left[\frac{g\ COD}{L}\right]$
- $Q_{biomasa\ entrante} = 1{,}0 \left[\frac{L}{d}\right]$
- $SV_{mezcla\ diarios} = SV_{mezcla} * Q_{biomasa\ entrante} = 11{,}2 \left[\frac{gCOD}{d}\right]$
- $Rendimiento\ metanogenico = {}^{Q_{CH4}}/_{SV_{mezcla\ diarios}} = 197{,}5 \left[\frac{ml\ CH4}{gCOD}\right]$
- Porcentaje de metano=59%
- Porcentaje de conversión a metano=42%

- Porcentaje de biodegradabilidad= 45%

6.2.3 Simulación 3

Se simulo un ensayo de digestión anaeróbica durante 75 días con los parámetros de entrada estipulados en la tabla 6-1 para la simulación 3, obteniendo los siguientes resultados:

Durante los primeros 15 dias se obtuvo un caudal de gas aproximadamente de 5,5 litros por dia, este a contar del dia 25 en adelante se estuvo estable cerca de los 5,15 litros por dia. Esta situacion se muestra en ilustración 6-5.

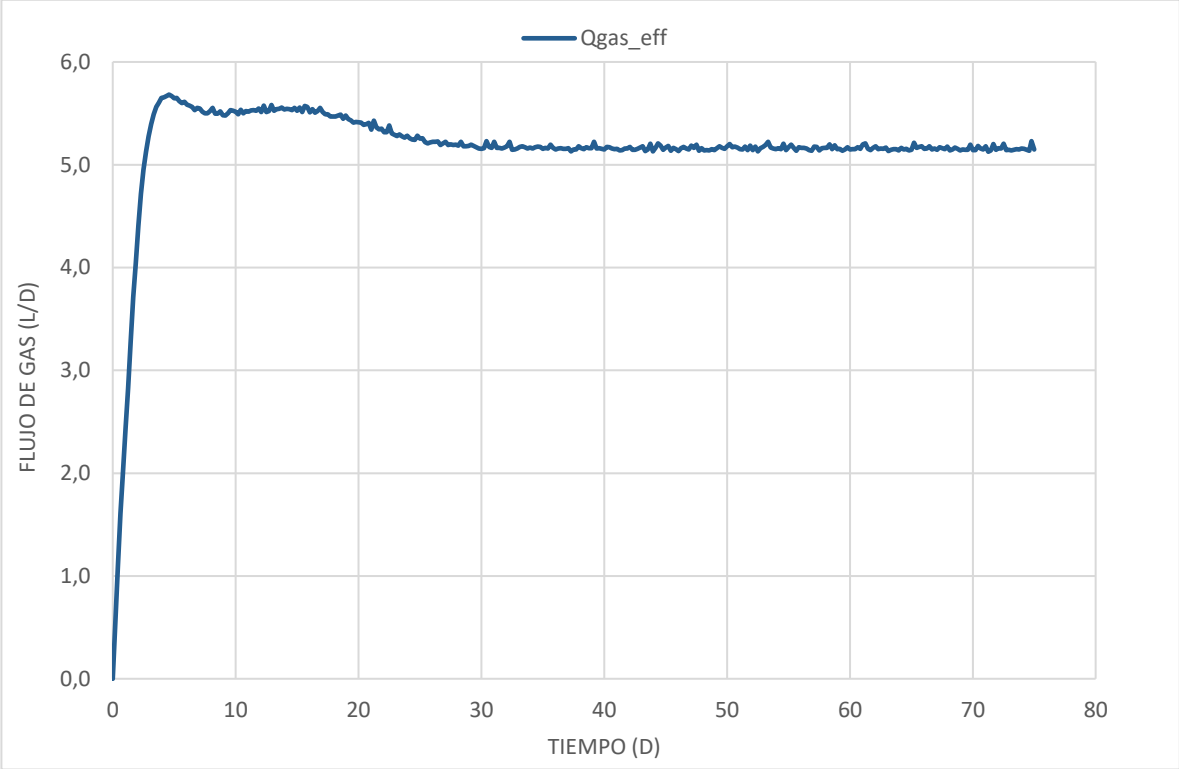


Ilustración 6-5: Flujo de biogás para simulación tres (Fuente: elaboración propia)

La presión parcial de los gases generados se presenta en la ilustración 6-6. A partir del día 15 en adelante se observa que los valores se mantienen constantes, siendo la presión parcial del metano de aproximadamente 0,585 y la del dióxido de carbono 0,415. Lo cual representa el porcentaje en volumen de cada especie.

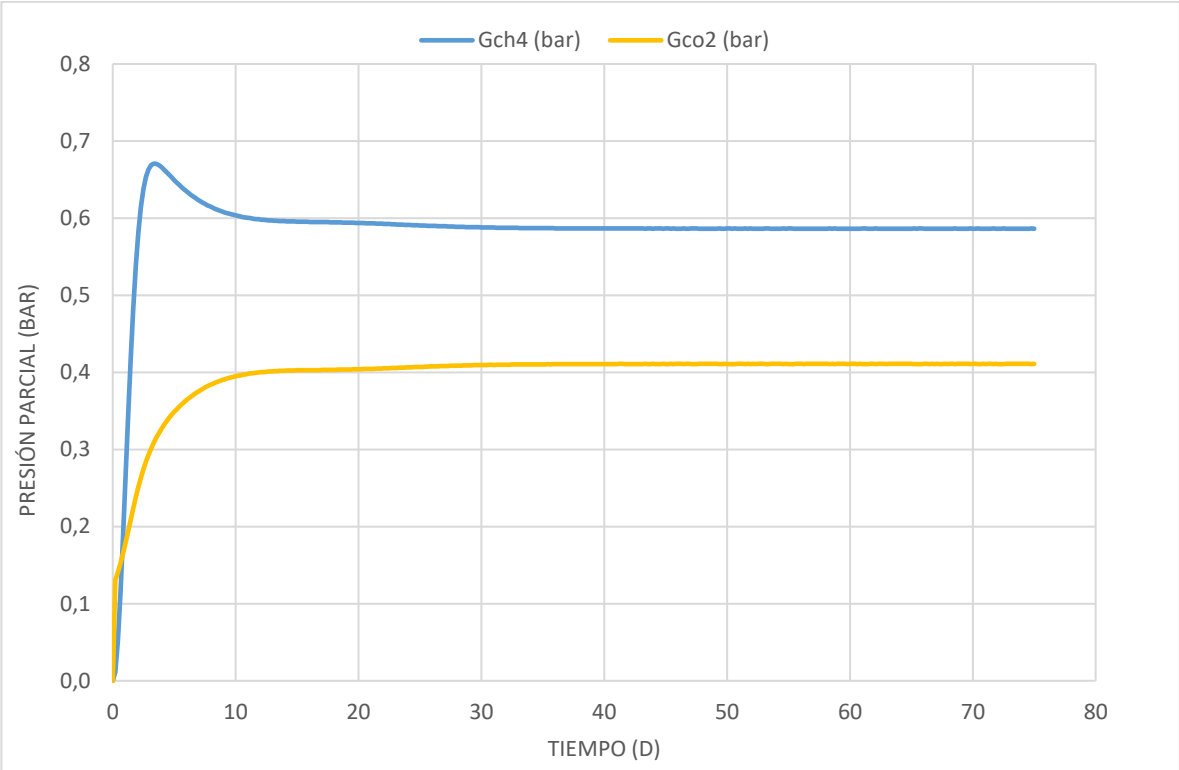


Ilustración 6-6: Presión parcial de las especies presentes en el biogás generado en simulación tres (Fuente: elaboración propia)

A partir de los gráficos presentados y datos de las simulaciones se puede determinar la cantidad de mililitros de metano generados por cada gramo de solidos volátiles ingresado al equipo digestor.

- $Q_{gas} = 5{,}15 \left[\frac{L}{d}\right]$
- $Q_{CH4} = Q_{gas} * 0{,}585 = 3{,}012 \left[\frac{L\ CH4}{d}\right] = 3.012 \left[\frac{ml\ CH4}{d}\right]$
- $SV_{mezcla} = 11{,}2 \left[\frac{g\ COD}{L}\right]$
- $Q_{biomasa\ entrante} = 1{,}4 \left[\frac{L}{d}\right]$
- $SV_{mezcla\ diarios} = SV_{mezcla} * Q_{biomasa\ entrante} = 15{,}68 \left[\frac{gCOD}{d}\right]$
- $Rendimiento\ metanogenico = {}^{Q_{CH4}}/_{SV_{mezcla\ diarios}} = 192{,}1 \left[\frac{ml\ CH4}{gCOD}\right]$
- Porcentaje de metano = 58,5%
- Porcentaje de conversión a metano = 42%
- Porcentaje de biodegradabilidad = 45%

6.3 RESUMEN DE RESULTADOS

Se presenta en la tabla 6-2 un resumen de los resultados obtenidos para las tres simulaciones

Tabla 6-2: Resumen resultados simulaciones de biodigestión (Fuente: elaboración propia)

Simulación	Caudal de gas estable [L/d]	Porcentaje de metano en gas [%]	Rendimiento metanogénico [ml CH4/g COD]	Porcentaje de biodegradabilidad [%]
1	3,6	60	197,8	45
2	3,75	59	197,5	45
3	5,15	58,5	192,1	45

7 CONCLUSIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este documento se logró diseñar un prototipo de biodigestor de 30 litros junto a sus parámetros constructivos, el cual está pensado para ser utilizado como un banco de pruebas para evaluar el potencial metanogénico de diversas biomasas. Se dimensiono un sistema solar fotovoltaico el cual tendrá la capacidad de garantizar alimentación al biodigestor con tal de que este pueda operar de forma autónoma de la red eléctrica. Inicialmente se planeaba realizar ensayos de metanización para determinar el potencial metanogénico del alga endémica chilena Durvillaea Antárctica, pero debido a las complicaciones asociadas a la pandemia del COVID-19 esto no fue posible, por lo cual se utilizó un modelo computacional para simular el proceso de biodigestión de esta alga.

Se obtuvieron valores de metanización para la macroalga Durvillaea Antárctica cercanos a los 200 ml por gramo de solidos volátiles, lo cual se encuentra dentro los parámetros esperados para algas mostrados en la sección 3.1. Estos resultados se obtuvieron en base a caracterizaciones encontradas en la literatura para algas pardas, por lo cual es altamente posible que estos valores puedan variar al realizar ensayos experimentales con Durvillaea Antárctica, ya que la cantidad de solidos volátiles en estas varían con las condiciones de crecimiento del alga. En particular si se tomasen algas de las playas de algarrobo es factible que se vieran incrementos en los rendimientos metanogénicos de estas debido a la alta concentración de materia orgánica en las aguas. Se obtuvieron porcentaje de biodegradabilidad de la biomasa del 45% aproximadamente, siendo el límite teórico según la caracterización utilizada de un 60%.

A través del balance térmico mostrado en la sección 4.3.3 se pudo determinar las pérdidas de calor por convección del equipo propuesto son bajas, esto se debe principalmente al bajo gradiente de temperatura con el ambiente y a las pequeñas dimensiones del equipo. Estas podrían presentar variaciones respecto a lo calculado en este trabajo debido a las siguientes razones:

- Los cálculos se basaron en el mes más frio del año, durante el resto de este las pérdidas de calor hacia el ambiente se verían disminuidas debido al aumento de temperatura, especialmente en los meses de verano donde se verían minimizadas.
- Se podrían disminuir las pérdidas de calor utilizando un aislante con menor conductividad térmica o aumentando el espesor de este.
- Debido a que el análisis se realizó en base a las condiciones climáticas promedio por día, las pérdidas de calor podrían variar debido a la naturaleza propia de las variaciones de temperatura de cada día.
- Al considerar otros mecanismos de intercambio de calor en los cálculos realizados, como, por ejemplo, el mecanismo de transferencia por radiación.

El mayor consumo de energía del equipo está asociada a el funcionamiento del motor de agitación del biodigestor (86,52%), el cual fue sobredimensionado ya que los parámetros de diseño para estanques con agitador son poco precisos para equipos de bajo volumen, principalmente por que la potencia requerida para agitar estos se ve altamente influenciada por el diámetro del agitador. Con el fin de que el equipo propuesto tenga un mayor rango de trabajo, se sugiere mantener o aumentar el sobredimensionamiento del motor con tal de que este pueda trabajar con biomasas de mayor densidad.

El criterio utilizado para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico considera el funcionamiento y autonomía de las cargas por 3 días durante el mes de menor radiación solar del año, por lo cual este se vio ampliamente sobredimensionado. Mediante un buen análisis técnico-económico este sistema podría verse disminuido con tal de disminuir el costo del equipo, principalmente considerando que el potencial lugar de emplazamiento de este equipo cuenta con acceso a la red de energía eléctrica y que las condiciones de operación real durante el año presentan mayores índices de radiación solar.

8 TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda considerar como trabajos futuros sobre el tópico presentado en este trabajo los siguientes puntos:

- La evaluación del equipo propuesto para distintos meses del año con tal de tener una percepción más cercana a las condiciones reales de operación.
- La construcción del equipo propuesto.
- Realizar un estudio con un equipo de mayores dimensiones a las propuestas en este estudio, con tal de estudiar la factibilidad técnico-económica del proceso.
- La realización de ensayos experimentales utilizando Durvillaea Antárctica con tal de tener el potencial metanogénico real de esta.
- La realización de ensayos experimentales utilizando Durvillaea Antárctica recolectada en la comuna de algarrobo debido a que se espera que está presente un mayor contenido de materia orgánica degradable.
- Realización de ensayos experimentales con otras especies de algas endémicas de la zona central chilena.

9 REFERENCIAS

[1] Rodrigo Ciruelo E., Plaga "algas verdes". Un problema de gobernanza [en línea],<https://www.algarrobodigital.cl/2019/04/plaga-algas-verdes-un problema-de.html>, [octubre 2020]

[2] Gabriel Henríquez, Prospección submarina en la rada de Algarrobo, enero 2018, departamento de medio ambiente de la comuna de Algarrobo

[3] Nuevo Siglo Consultores Spa, informe final PLADECO Algarrobo [en línea], <http://1.municipalidadalgarrobo.cl/transparencia2/2017/municipal/Informe%20Final%20PLADECO%20Algarrobo.pdf> [consulta agosto 2017]

[4] O.Fernandez y A.Neira, Proliferación de alga "se toma" playas de Algarrobo y afecta a vecinos y turistas [en línea], <https://www.latercera.com/noticia/proliferacion-de-alga-se-toma-playas-de-algarrobo-y-afecta-a-vecinos-y-turistas/>, [octubre 2020]

[5] YUNUS A. CENGEL, Transferencia de calor y masa, 3° edición, Mc Graw Hill, México 2007

[6] José Antonio Carta González [et al], Centrales de energías renovables, Madrid 2009, Pearson educación.

[7] Vladimir Castillo Uribe, diseño y cálculo de un agitador de fluidos, Tesis ingeniería en ejecución mecánica, Universidad del Bio-Bio, departamento de ingeniería mecánica 2013.73 hojas.

[8] Jaksic, F., Santelices. B. (1991). ¿Alguien lee a los ecólogos chilenos? [en línea], Revista Chilena de Historia Natural, < http://rchn.biologiachile.cl/pdfs/1991/1/Jaksic_&_Santelices_1991.pdf>, [consulta octubre 2020]

[9] Bernabé Santelices, Algas marinas de chile: distribución, ecología, utilización, diversidad [en línea], Universidad de Minnesota, ediciones Universidad Catolica de Chile, 1989 https://books.google.cl/books/about/Algas_marinas_de_Chile.html?id=Gwf7nAEACAAJ&redir_esc=y, [Consulta octubre 2020]

[10] Atlas de sensibilidad ambiental del mar y la costa, floraciones algales nocivas [en línea] <https://www.researchgate.net/publication/285479252_Floraciones_de_algas_toxicas> [consulta octubre 2020]

[11] A.J. Ward, D.M. Lewis, F.B. Green, Anaerobic digestion of algae biomass: A review [en línea]

< https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211926414000216> [consulta octubre 2020]

[12] Mantas Felneris and Laurencas Raslavicious, Algal biodiesel in Lithuania: from promise to reality [en línea], Vilnius, Lithuania 2016. < https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1877705816000497?token=59BACE1110D516D7149EB1F378A7BD062D581D6BCE3095F6CE126617ECFA60E8AF893F9DD8D6C79558EC70B86D0B9938>, [consulta octubre 2020]

[13] Adam D Hughes, Maeve S Kelly, Kenneth D Black and Michele S Stanley, 2012. Biogas from Macroalgae: is it time to revisit the idea? [en línea] Biotechnology for fuels, <https://www.researchgate.net/publication/233787422_Biogas_from_Macroalgae_Is_it_Time_to_Revisit_the_Idea> [consulta octubre 2020]

[14] Francesco Romagnoli [et al], Biogas from Marine Macroalgae: a New Environmental Technology-life Cycle Inventory for a further LCA [en línea], University of Rome "La Sapienza", < https://www.researchgate.net/publication/258448310_Biogas_from_Marine_Macroalgae_A_New_Environmental_Technology_-_Life_Cycle_Inventory_for_a_Further_LCA>, [consulta octubre 2020]

[15] Orduna D., Buenanueva F., Esteveres A., Biodigestor calefaccionado con energía solar para producción discontinua de biogás [en línea], < http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/94016/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[16] J.N. Martín, G Barea, S. Manrique. A. Esteves, modelado de comportamiento térmico de un biodigestor, calefaccionado con energía solar, mediante el software Simusol [en línea] <https://www.researchgate.net/publication/329371717_MODELADO_DE_COMPORTAMIENTO_TERMICO_DE_UN_BIODIGESTOR_CALEFACCIONADO_CON_ENERGIA_SOLAR_MEDIANTE_EL_SOFTWARE_SIMUSOL>

[17] S. Tedesco, K.Y.Benyounis, A.G. Olabi,Mechanical pretreatment effects on macroalgae-derived biogas production in co-digestion whit sludge in Ireland[en línea], <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544213001059>

[18] Dubó Paulo, Metanización solar de algas endémicas de la región de Valparaíso para la producción de biogás combustible. Tesis (Ingeniería civil mecánica). Valparaíso. UTFSM, departamento de ingeniería mecánica 2019.

[19] S. Wang [et al] ,Research of specific heat capacities of three large seaweed biomass [en línea], < https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-013-3141-0>

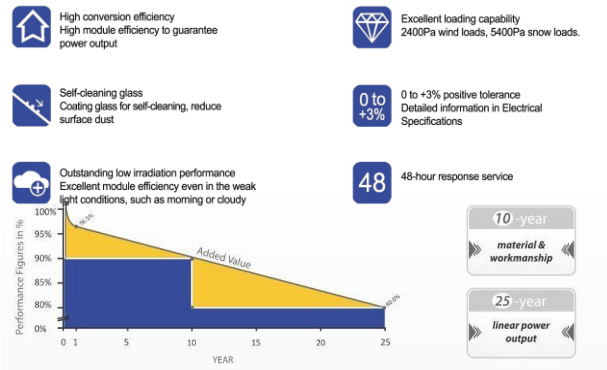
[20] Miguel Alonso Abella, Dimensionado de sistemas fotovoltaicos [en línea], < http://calculationsolar.com/pdfs/Calculationsolar_module_GHSOLAR_GH250P30937.pdf

10 ANEXOS

10.1 ANEXO 1: FICHAS TÉCNICAS COMPONENTES SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

10.1.1 Ficha técnica módulo solar JX-60M

Specifications	
Model	JX156-36M Series
Solar cell	Monocrystalline 63*156mm
No. of cells and connections	36(4*9)
Dimension(mm)	620*670*30mm
Weight(kg)	5.4
Electrical Characteristics	
Maximum Power(Pm)	60W
Current at Pmax(Imp）	3.33A
Voltage at Pmax(Vmp)	18V
Short-circuit current(Isc)	3.57A
Open-circuit voltage(Voc）	21.78V
Cell Efficiency	16.96%
Module Efficiecy	14.44%
Temperature and Coefficients	
NOCT（Nominal Operating Cell	48℃±2℃
Short-circuit current temp	(0.03±0.01）%℃
Open-circuit current temp	—(0.36±0.02）%℃
Peak power temp coeffficient	—(0.55±0.05）%℃
Power Tolerance	±3%
Type of output terminal	Junction Box
Components&Mechanical Data	
Front Glass	High Transparency Tempered Glass, 3.2mm
Junction Box	Pass the TUV Certificate PPO(black/IP65)
Output Cables	4 mm2 / 900mm
Connectors	MC4(UV resistance and self-locking/IP 67)
Frame	Anodized aluminum alloy type 6063-T5, white
Encapsulation Material	EVA (0.50±0.03mm thickness)
Back Foil	Transparent TPT (0.32±0.03mm thickness)
Fixing adhesive	Silicon Sealant (white)
Maximum System voltage	1000VDC
Temperature Rang (°C)	-40℃ ~ +90℃
Max Load(Kpa)	2.4 wind load / 5.4 snow load



10.1.2 Batería Bosch 70 Ah S4 CCA 600

ARRANQUE EN FRÍO (CCA)	600
TIPO	PARA AUTOMÓVIL
POLARIDAD BORNE	POSITIVO DERECHO
VOLTAJE BATERÍA	12 V
AMPERAJE BATERÍA	70 AH
PESO	18.2 KG
DIMENSIONES	260X173X222 MM

10.1.3 regulador de carga XTRA 3210N

Item	XTRA 1206N	XTRA 2206N	XTRA 1210N	XTRA 2210N	XTRA 3210N	XTRA 4210N	XTRA 3215N	XTRA 4215N	XTRA 3415N	XTRA 4415N
Electrical										
System Nominal Voltage	12/24VDC① Auto								12/24/36/48VDC① Auto	
Rated Charge Current	10A	20A	10A	20A	30A	40A	30A	40A	30A	40A
Rated Discharge Current	10A	20A	10A	20A	30A	40A	30A	40A	30A	40A
Battery Voltage Range	8~32V								8~68V	
Max. PV Open Circuit Voltage	60V ② 46V ③		100V ② 92V ③				150V ② 138V ③			
MPPT Voltage Range	(Battery voltage +2V)~36V		(Battery voltage +2V)~72V				(Battery voltage +2V)~108V			
Max. PV Input Power (W/V)	130/12 260/24	260/12 520/24	130/12 260/24	260/12 520/24	390/12 780/24	520/12 1040/24	390/12 780/24	520/12 1040/24	390/12 780/24 1170/36 1560/48	520/12 1040/24 1560/36 2080/48
Equalization Voltage ④	Sealed: 14.6V; Flooded: 14.8V; User: 17~9V									
Boost Voltage ④	Gel:14.2V; Sealed:14.4V; Flooded:14.6V; User: 17-9V									
Float Voltage ④	Gel /Sealed /Flooded: 13.8V; User: 17~9V									
Low Voltage Reconnect Voltage ④	Gel /Sealed /Flooded: 12.6V; User: 17~9V									
Low Voltage Disconnect Voltage ④	Gel /Sealed /Flooded: 11.1V; User: 17~9V									
Self-consumption	≤14mA(12V) ≤15mA(24V)		≤35mA(12V) ≤22mA(24V)						≤35mA(12V) ≤22mA(24V)	≤16mA(36V) ≤16mA(48V)
Discharge circuit voltage drop	≤0.23V									
Temperature Compensate coefficient ⑤	-3mV/°C/2V (Default)									
Grounding	Common negative grounding									
RS485 interface	5VDC/200mA (RJ45)									
LCD backlight time	60S (Default)									

Environmental	
Working environment temperature ④ (full rated power with no derating)	-25℃～+50℃(LCD)；-30℃～+50℃(No LCD)
Storage temp. range	−20°C～+70°C
Relative humidity	≤95%，N.C.
Enclosure	IP33 ①
Pollution degree	PD2

Item	XTRA 1206N	XTRA 2206N	XTRA 1210N	XTRA 2210N	XTRA 3210N	XTRA 4210N	XTRA 3215N	XTRA 4215N	XTRA 3415N	XTRA 4415N
Certification										
Safety	EN/IEC62109-1									
EMC(Emission immunity)	EN61000-6-3/EN61000-6-1									
FCC	47 CFR Part 15, Subpart B									
Performance &function	IEC62509									
ROHS	IEC62321-3-1									

Item	XTRA 1206N XTRA 1210N	XTRA 2206N XTRA 2210N	XTRA 3210N	XTRA 4210N XTRA 3215N	XTRA 4215N XTRA 3415N	XTRA 4415N
Mechanical						
Dimension(mm)	175×143×48	217×158×56.5	230×165×63	255×185×67.8	255×187×75.7	255×189×83.2
Mounting dimension(mm)	120×134	160×149	173×156	200×176	200×178	200×180
Mounting hole size	Φ5mm					
Terminal	12AWG(4mm2)	6AWG(16mm2)	6AWG(16mm2)	6AWG(16mm2)	6AWG(16mm2)	6AWG(16mm2)
Recommended cable	12AWG(4mm2)	10AWG(6mm2)	8AWG(10mm2)	6AWG(16mm2)	8AWG(16mm2)	6AWG(16mm2)
Weight	0.57kg	0.96kg	1.31kg	1.70kg	2.07kg	2.47kg

10.1.4 Inversor Truepower KS-1000-212

GERMAN TECHNOLOGY
TRUEPOWER

1000W True Sine Wave DC-AC Inverter

KS-1000P series

Features :

- True sine wave output (THD<5%)
- High surge power up to 2000W
- High efficiency up to 92%
- Power ON-OFF switch
- Standby saving mode
- Front panel indicator for operation status
- Thermostatically and Load controlled cooling fan
- Protections: Bat. low alarm / Bat. low shutdown /Bat. Over shutdown / Output short / Input polarity everse / Overload/Over Temp
- 1.5Times rated power for 10s ,2 times for 2s
- 1.5 years warranty

CE LVD

SPECIFICATION

MODEL		KS-1000-112	KS-1000-124	KS-1000-148	KS-1000-212	KS-1000-224	KS-1000-248
OUTPUT	RATED POWER	1000W					
	MAXIMUM OUTPUT POWER	1100W for 180 sec. / 1200W for 10 sec. / surge power 2000W for 2 sec					
	AC VOLTAGE	Factory Setting set at 110V AC			Factory Setting set at 230V AC		
		100/110/115/120VAC (Option)			220/230/240VAC Option		
	FREQUENCY	Factory Setting set at 60Hz (50/60Hz Option)			Factory Setting set at 50Hz (50/60Hz Option)		
	WAVE FORM	Ture Sine Wave(THD<4%) at rated input voltage					
	AC REGULATION	5%					
	STANDARD RECEPTACLES	Schuko/UK/Australia/Universal/USA/France/JP/Brazil					
	FRONT PANEL INDICATOR	Operation and Fault status					
INPUT	BAT. VOLTAGE	12V	24V	48V	12V	24V	48V
	VOLTAGE RANGE	10.8 ~ 15.5VDC	21.6 ~ 31VDC	43.2 ~ 62VDC	10.8 ~ 15.5VDC	21.6 ~ 31VDC	43.2 ~ 62VDC
	DC CURRENT	100A	50A	25A	100A	50A	25A
	FUSE	35A*4	20A*4	10A*4	35A*4	20A*4	10A*4
	NO LOAD CURRENT DRAW	0.56A	0.28A	0.14A	0.56A	0.28A	0.14A
	EFFICIENCY	88%	90%	91%	89%	91%	92%
	BATTERY TYPES	Recommend use Open & sealed lead acid battery					
BATTERY INPUT PROTECTION	BAT.LOW ALARM	10.8+/-0.2V	21.6+/-0.4V	43.2+/-0.8V	10.8+/-0.2V	21.6+/-0.4V	43.2+/-0.8V
	BAT.LOW SHUTDOWN	10.2+/-0.2V	20.4+/-0.4V	40.8+/-0.8V	10.2+/-0.2V	20.4+/-0.4V	40.8+/-0.8V
	BAT.OVER SHUTDOWN	15.5+/-0.2V	31+/-0.4V	62+/-0.8V	15.5+/-0.2V	31+/-0.4V	62+/-0.8V
	REVERSE POLARITY	By fuse open					
OUTPUT	OVER TEMPERATURE	75℃					
	OUTPUT SHORT	Protection type : Shut down o/p voltage, re-power on to recover					
	OVER LOAD	120% Rated power / Protection type : Shut down o/p voltage, re-power on to recover within 10 times					
ENVIRONMENT	WORKING TEMP.	0 ~ +40℃ @100% Load; 60 ℃ @ 50% Load					
	WORKING HUMIDITY	20%-90% RH non-condensing					
	STORAGE TEMP	-30~+70 ℃ /-22~ +158° F					
	STORAGE HUMIDITY	10-95% RH non-condensing					
SAFETY	CE	Compliance to EN61000-3-2,3					
	LVD	Compliance to EN60950-1					
	ROHS	Compliance to EN11228:2001-1					
LED BUZZER	LOW BAT ALARM	Buzzer sound 2 times and Red light blink 2 times every 8 Sec					
	LOW BAT SHUT DOWN	Buzzer sound 3 times and Red light blink 3 times every 8 Sec					
	OVER BAT SHUT DOWN	Buzzer sound 4 times and Red light blink 4 times every 8 Sec					
	OVER TEMP	Buzzer sound 5 times and Red light blink 5 times every 8 Sec					
	OVER LOAD	Light Blink Constantly					
OTHER	COOLING	Load and Temp control the Fan					
	CONTROL WIRING	RJ11					
	DIMENSION	310*150*70mm (L*W*H)					
	PACKING	3.15KG;4PCS/15.5KGS/CARTON					
	APPLICATION	Home and office appliances, Power Tools and Portable Equipment, Vehicle,Yacht and Solar System					
NOTE	1.Volue test by input voltage at 13V,26V,48V. 2.All parameters are measured at rated load,25℃ of ambient temperature. 3.The specifications are subject to change without prior notice for further improvement of products						