

DISEÑO TEÓRICO DE UN SISTEMA AUTOSUSTENTABLE PARA LA GENERACIÓN
DE BIOMASA DE USO COMO ALIMENTO VACUNO

SILVIA JULIANA SANABRIA URIBE
LAURA ALEJANDRA PIÑEROS SOLANO

Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERA QUÍMICA

Orientadora

Adriana Suesca Díaz

Ingeniera Química

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del director

Nombre
Firma del presidente jurado

Nombre
Firma del jurado

Nombre
Firma del jurado

Bogotá D.C. agosto de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano General Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Directora del Departamento de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Agradecimiento 1

A Dios, por permitirme llegar hasta aquí, por ser mi guía y a la vez mi fortaleza en todo momento.

A mi mamá, por el apoyo emocional en los momentos de crisis y ser mi amiga incondicional.

A mi papá, por su esfuerzo y dedicación, por ser el sustento de mi hogar. Sin el apoyo de él y las ganas de ver a sus hijas exitosas no hubiera llegado hasta aquí.

A momio, Diego Ruíz, por su apoyo y amor incondicional, por sus abrazos y palabras cuando me sentía agotada, también las mañanas en el alto de patios en donde me llenaba de energía para empezar los días.

A mi compañera de tesis, por su liderazgo, por siempre ser la persona que tomaba todo con calma y por ser la mejor co-equipera.

A Doña Amparo y Don Marco, mis suegros, por todas las veces que se preocuparon por mí, por regañar a Diego cuando me distraía haciendo la tesis y por las onces cuando estaba en la casa de ellos.

A Gohan, mi compañero gatuno, por los días y noches que se sentó a mi lado y no me dejaba sola en ningún momento.

-Laura Alejandra Piñeros Solano

Agradecimiento 2

A Roci, mi mamá, por el apoyo, por aguantar conmigo el estrés y ser una ayuda constante. Sin esa ayuda este proyecto no hubiera quedado tan bien.

A Pacho, mi papá, por la paciencia, por nunca decir “no” a explicarme y a ayudarme. Y finalmente pero no menos importante, por calentar mis pies en las noches en la que me quedaba hasta tarde trabajando en este proyecto.

A mi hermano Juan Diego, por ser mi desconexión y por hacerme reír cuando lo necesitaba.

A mi novio, Juan Esteban, por las palabras de aliento, por escuchar, por aconsejar y por todo lo que me da sin pedírselo.

A mi familia, en especial, Digna Gutiérrez, por todas las oraciones y las palabras de ánimo.

A mi compañera de tesis por guerrearla juntas y por estar siempre ahí.

A mis amigos: Natalia Sánchez, Natalia Mendoza, Julián Rincón, no solo por la ayuda, el apoyo y hacer más llevadero el proceso de este trabajo sino también de esta carrera.

A Camila Beltrán y a Iván Sanabria por la paciencia para enseñarme sobre vacas. Pues, así no supieran las respuestas, tenían siempre una forma de responderme.

A Rubén Darío Godoy, por la guía y la disposición para guiar nuestra tesis por el camino correcto. Y a Adriana Suesca por estar cada lunes presente con la mejor energía y disposición para escuchar atentamente nuestras inquietudes y dudas.

Y, finalmente, a Dios por darme la bendición de estudiar y por toda la fortaleza.

-Silvia Juliana Sanabria Uribe

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos únicamente corresponden a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág
RESUMEN	16
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	18
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1. Biodigestor	20
1.1.1. <i>Partes de un biodigestor</i>	20
1.1.2. <i>Tipos de biodigestor</i>	22
1.1.3. <i>Digestión anaerobia</i>	26
1.1.4. <i>Etapas de la digestión anaerobia</i>	26
1.1.5. <i>Microorganismos presentes en la digestión anaerobia</i>	27
1.2. Biogás	29
1.3. Aprovechamiento del biogás en quemadores	31
1.3.1. <i>Características de los quemadores empleados con biogás</i>	32
1.3.2. <i>Problemas comunes de los quemadores de biogás</i>	33
1.4. Fotobiorreactor	34
1.4.1. <i>Reacciones</i>	34
1.4.2. <i>Microalgas</i>	36
1.4.3. <i>Parámetros de diseño de un fotobiorreactor</i>	38
1.4.4. <i>Tipos de fotobiorreactores</i>	39
2. GENERALIDADES E INFORMACIÓN DEL HATO LECHERO	46
2.1. Identificación de las razas y la capacidad	46
2.2. Caracterización de las condiciones ambientales	47
2.3. Estimación de las excretas	48
2.3.1. <i>Comparación bibliográfica</i>	57
2.3.2. <i>Flujo másico de sustrato</i>	59
2.3.3. <i>Estimación de la cantidad de agua adicional</i>	59
2.4. Alimentación	60
3. BIODIGESTOR	62
3.1. Elección del tipo de biodigestor	62
3.2. Pretratamiento del sustrato	65

3.2.1.	<i>pH</i>	66
3.2.2.	<i>Relación carbono/nitrógeno</i>	67
3.2.3.	<i>Proporción estiércol: agua</i>	67
3.2.4.	<i>Micronutrientes</i>	67
3.3.	Selección composiciones iniciales	68
3.4.	Especificaciones técnicas del diseño estándar de un biodigestor tubular	75
3.4.1.	<i>Dimensiones del biodigestor tubular</i>	75
3.4.2.	<i>Dimensiones de la zanja de los biodigestores tubulares</i>	79
3.4.3.	<i>Diseño solar</i>	81
3.5.	Balance de materia del biodigestor	83
3.5.1.	<i>Producción de biogás</i>	83
3.5.2.	<i>Balance de materia global</i>	89
3.5.3.	<i>Humedad</i>	92
3.5.4.	<i>Sólidos totales</i>	93
3.5.5.	<i>Sólidos suspendidos</i>	94
3.5.6.	<i>Sólidos volátiles</i>	95
3.5.7.	<i>Nitrógeno</i>	96
3.5.8.	<i>Fósforo</i>	96
3.5.9.	<i>Potasio</i>	97
3.6.	Bioabono	98
3.7.	Flujo de energía en el biodigestor	99
4.	TRATAMIENTO DE BIOGÁS	100
4.1.	Composición del biogás crudo para el tratamiento	100
4.2.	Acondicionamiento del biogás	101
4.2.1.	<i>Tipos de remoción de las trazas de agua</i>	103
4.2.2.	<i>Tipos de remoción de sulfuro de hidrógeno</i>	104
4.3.	Acondicionamiento final del biogás	106
4.3.1.	<i>Remoción de las trazas de agua</i>	107
4.3.2.	<i>Remoción de sulfuro de hidrógeno (H₂S)</i>	107
4.4.	Composición final después del pretratamiento	108
4.5.	Instrumentos de control para el acondicionamiento	109
4.5.1.	<i>Tanque de almacenamiento</i>	109

4.5.2.	<i>Válvula de alivio</i>	110
4.5.3.	<i>Manómetros</i>	111
4.5.4.	<i>Sistema de distribución de biogás</i>	112
5.	CÁMARA DE COMBUSTIÓN	114
5.1.	Disponibilidad de biogás	114
5.2.	Relación metano-oxígeno para la combustión	114
5.2.1.	<i>Rango de inflamabilidad</i>	115
5.2.2.	<i>Temperatura de combustión</i>	116
5.3.	Análisis de combustible	118
5.3.1.	<i>Poder calorífico inferior del biogás</i>	119
5.4.	Selección de la cámara de combustión	120
5.4.1.	<i>Principios básicos del horno</i>	125
5.4.2.	<i>Balance de materia</i>	131
5.2.3.	<i>Balance de energía en el horno</i>	141
6.	FOTOBIORREACTOR	146
6.1.	Ecuación de la biomasa	146
6.2.	Funcionamiento del fotobiorreactor	149
6.3.	Premisas de diseño (condiciones ambientales)	153
6.3.1.	<i>Temperatura</i>	153
6.3.2.	Presión	154
6.3.3.	<i>pH</i>	154
6.3.4.	<i>Concentración inicial de la biomasa</i>	154
6.3.5.	<i>Densidad</i>	154
6.3.6.	<i>Turbulencia</i>	155
6.4.	Balance de materia	156
6.4.1.	<i>Fijación de dióxido de carbono</i>	156
6.4.2.	<i>Nutrientes</i>	156
6.4.3.	<i>Inyección de dióxido de carbono</i>	158
6.4.4.	<i>Flujo de salida de biomasa</i>	159
6.4.5.	<i>Balance molar de la reacción de producción de biomasa</i>	160
6.4.6.	<i>Agua</i>	161
6.5.	Balance de energía	161

6.6.	Postratamiento	164
6.7.	Requerimientos especiales	165
6.8.	Beneficios de la Spirulina en dietas de rumiantes	166
7.	COSTOS DE EJECUCIÓN	167
7.1.	Costos directos	169
7.2.	Costos indirectos	175
7.3.	Ingresos	181
7.4.	Análisis financiero	182
8.	CONCLUSIONES	190
	BIBLIOGRAFÍA	191
	ANEXOS	202

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Esquema básico de un biodigestor doméstico	21
Figura 2. Esquema de un biodigestor de domo fijo	23
Figura 3. Esquema de un biodigestor de domo flotante	24
Figura 4. Esquema de un biodigestor de estructura flexible	25
Figura 5. Respiración anaeróbica	26
Figura 6. Reacciones de la digestión	29
Figura 7. Ciclo de Calvin	35
Figura 8. Estructura de <i>Arthrospira Platensis</i>	37
Figura 9. Esquema de un biorreactor convencional	39
Figura 10. Esquema reactor en columna	40
Figura 11. Esquema de reactor plano	41
Figura 12. Esquema de reactor airlift	42
Figura 13. Reactor tubular helicoidal	43
Figura 14. Tanques de canalización de las empresas Earthrise y Cyanotech	44
Figura 15. Imagen esquemática del funcionamiento de un tanque de canalización	45
Figura 16. Mapa satelital de la laguna de Fúquene	48
Figura 17. Distribución del tiempo por bovino al día	55
Figura 18. Esquema de un cilindro	78
Figura 19. Esquema de la zanja en forma trapezoidal	80
Figura 20. Biodigestor con diseño solar implementado	82
Figura 21. Temperatura (°C) versus biogás (m ³) por kilogramos de sólidos totales a presión atmosférica	84
Figura 22. Biodigestor con sus respectivos flujos	90
Figura 23. Biodigestor con sus respectivos flujos	92
Figura 24. Esquema de diseño de trampa de condensado en tubería PVC	107
Figura 25. Empaque de filtro de óxido férrico	108
Figura 26. Tanque de almacenamiento en forma de cúpula	110
Figura 27. Válvula de globo	111
Figura 28. Representación de un manómetro tipo esfera	112

Figura 29. Sistema de distribución de tuberías en PVC	113
Figura 30. Llama ideal de biogás según la temperatura	117
Figura 31. Diseño de horno a gas y sus partes	127
Figura 32. Representación de un quemador tipo Venturi	128
Figura 33. Representación de un quemador de aire forzado	129
Figura 34. Representación de un quemador de aire forzado con tuberías internas	130
Figura 35. Sistema de combustión tipo Venturi con tubería	131
Figura 36. Ilustración del balance de materia en el horno de combustión	141
Figura 37. Diagrama de distribución de accesorios del tanque de canalización	151
Figura 38. Diagrama de dimensiones del tanque de canalización	153
Figura 39. Flujo de agua a lo largo del sistema del fotobiorreactor	161
Figura 40. Diagrama de flujos másicos y energéticos posteriores a la cámara de combustión	162
Figura 41. Diagrama de flujo en bloques del diseño propuesto	168
Figura 42. Porcentajes de inversión según cada sistema de diseño	175
Figura 43. Comparación entre gastos fijos y gastos extras anuales	181

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Microorganismos presentes en cada una de las fases	28
Tabla 2. Componentes típicos del biogás	30
Tabla 3. Propiedades físicas típicas del biogás	31
Tabla 4. Valores comunes de algunas propiedades de la combustión de biogás	32
Tabla 5. Características de una cámara de combustión	33
Tabla 6. Especies de microalga y su tolerancia máxima de CO ₂	36
Tabla 7. Ubicación geográfica de la vereda Nemoga	47
Tabla 8. Condiciones climáticas de la vereda Nemoga	48
Tabla 9. Variables y parámetros para el cálculo del flujo de sólidos totales ingeridos	52
Tabla 10. Distribución horaria en las zonas del Hato lechero	54
Tabla 11. Variables y parámetros para el cálculo del flujo de sólidos totales excretados	57
Tabla 12. Valores experimentales del porcentaje de masa seca y húmeda	58
Tabla 13. Requerimientos nutricionales	61
Tabla 14. Horario sobre alimentación del ganado del hato lechero	61
Tabla 15. Tabla de decisión sobre el tipo de biodigestor	62
Tabla 16. Concentración inhibidora de inhibidores comunes identificados	66
Tabla 17. Características del proyecto de la Finca del Oriente Ecuatoriano	68
Tabla 18. Propiedades físico y químicas del ganado en Orellana	70
Tabla 19. Características del proyecto de la productora lechera en Jalisco	71
Tabla 20. Propiedades físico y químicas del ganado en Jalisco	72
Tabla 21. Características del proyecto de una finca en Riobamba	73
Tabla 22. Propiedades físico y químicas del ganado en Riobamba	74
Tabla 23. Características del proyecto de una finca en Tlaxcala	75
Tabla 24. Relación de producción de biogás, temperatura y sólidos totales	83
Tabla 25. Información sobre tasa de biogás según artículo con diferentes parámetros	86
Tabla 26. Composición del biogás obtenido en la estación TUNSHI-ESPOCH	87
Tabla 27. Composición del biogás obtenido en la construcción de una granja integral autosuficiente	88

Tabla 28. Composición del biogás obtenido en biodigestor operado en Cuba	88
Tabla 29. Valores definidos del biogás que se utilizará en el presente proyecto	89
Tabla 30. Densidad de los componentes del biogás y aire a 20°C	91
Tabla 31. Valores de agua en la entrada y salidas del biodigestor	93
Tabla 32. Valores de sólidos totales en entrada y salidas del biodigestor	100
Tabla 33. Valores de sólidos suspendidos en entrada y salida del biodigestor	95
Tabla 34. Valores de sólidos volátiles en entrada y salida del biodigestor	95
Tabla 35. Valores de nitrógeno en entrada y salidas del biodigestor	96
Tabla 36. Valores de fósforo en entrada y salida del biodigestor	97
Tabla 37. Valores de potasio en entrada y salida del biodigestor	97
Tabla 38. Composición de biogás para el tratamiento	101
Tabla 39. Tratamiento según el uso final del biogás	102
Tabla 40. Requerimientos de pureza para el uso de biogás	104
Tabla 41. Composición del biogás tratado	109
Tabla 42. Comportamiento de la relación metano-oxígeno	115
Tabla 43. Composición de la mezcla final entre el biogás y el aire	116
Tabla 44. Problemas comunes dentro de las cámaras de combustión	118
Tabla 45. Dispositivos para el aprovechamiento del biogás	122
Tabla 46. Composición de la entrada de biogás al quemador	133
Tabla 47. Resultado del balance de materia de metano	134
Tabla 48. Resultado del balance de materia del oxígeno	135
Tabla 49. Características del aire en exceso en la laguna de Fúquene	136
Tabla 50. Resultado del balance de materia del agua	137
Tabla 51. Resultado del balance de materia del dióxido de carbono	138
Tabla 52. Resultado del balance de materia de Nitrógeno	138
Tabla 53. Resultado del balance de materia total en la entrada	139
Tabla 54. Resultado de la corriente de gases de salida en el horno	140
Tabla 55. Coeficientes para determinar la capacidad calorífica	142
Tabla 56. Características del biogás	144
Tabla 57. Composición elemental de la <i>Arthrospira platensis</i> según artículo	148
Tabla 58. Especificaciones del medio de Zarrouk	157

Tabla 59. Cantidades de los ingredientes del medio de Zarrouk a ingresar cada cuatro días	158
Tabla 60. Balance molar reacción producción biomasa	160
Tabla 63. Cantidad y porcentaje de Spirulina obtenida en cada lote	165
Tabla 64. Planteamiento de los costos fijos	170
Tabla 65. Especificaciones de la bomba Silver 10	176
Tabla 66. Especificaciones del compresor Pcp y Scuba	176
Tabla 67. Especificaciones de aireadores de paleta	177
Tabla 68. Especificaciones del quemador EQA 79	177
Tabla 69. Inversión sobre los gastos extras	178
Tabla 70. Costo sobre el consumo de agua anual	179
Tabla 71. Tiempo establecido de equipos por año	180
Tabla 72. Costo sobre el consumo de energía anual	180
Tabla 73. Ingresos por la venta Spirulina anual	182
Tabla 74. Tabla de amortización del crédito	184
Tabla 75. Desarrollo del flujo de caja	187
Tabla 76. Porcentaje de incremento por ingresos anuales	189
Tabla 77. Resultados del cálculo de la TIR	189

RESUMEN

El presente trabajo se realizó a partir de una problemática ambiental generada por la escorrentía del estiércol generado por un hato lechero ubicado en la vereda Nemoga. Inicialmente se desarrolló un diagnóstico para la estimación de la cantidad de estiércol recolectable producido dando como resultado un valor de 3.013,91 kg Estiercol/día por 280 bovinos. Para definir las características del estiércol y la relación de agua para usar como premezcla, se compararon varias investigaciones a nivel bibliográfico, en las cuales se desarrollaban a partir del estiércol bovino.

Buscando las alternativas de un sistema de biodigestión, el biodigestor tubular fue la opción que mejor se adecuó al hato lechero. El diseño se realizó según los parámetros de dimensionamiento y condiciones de operación establecidos bibliográficamente, en el cual se produjo una cantidad de biogás de 83,06 m³/día.

Según las características del biogás, se seleccionó un horno de ladrillo como cámara de combustión para aprovechar la energía liberada, la cual se calculó por el balance de energía con base a la corriente de salida de los gases de combustión, en donde la temperatura fue 957,46°C; con base en esa temperatura se aprovechó por medio de un serpentín al tanque de almacenamiento del agua que ingresa luego al fotobiorreactor como medio de calefacción.

Posteriormente se desarrolló el diseño de un fotobiorreactor para la producción del alga *Arthrospira platensis* (Spirulina) con el uso de un tanque de canalización. Para el diseño se calculó las dimensiones con base a los balances de masa (método caja negra) y energía, en donde la cantidad de Spirulina por lote fue de 17,79 kg.

Finalmente se realizó una estimación de costos de inversión para la construcción de todo el proceso y las ganancias anuales por la venta del alga, en donde el costo de inversión bruto con los costos de servicios y mantenimientos fue de total de \$86.360.193,06COP, y los ingresos por venta de Spirulina anual fueron de \$ \$235.644.957,64 COP.

Palabras Clave: Estiércol, Biodigestor tubular, combustión, Fotobiorreactor, *Arthrospira platensis*

INTRODUCCIÓN

La Laguna de Fúquene, ubicada en el departamento de Cundinamarca y Boyacá, es uno de los cuerpos de agua dulce más importantes de Colombia. Sin embargo, desde el 2001 las personas del lugar han alarmado a las instituciones gubernamentales debido a las condiciones del recurso hídrico.

Todas las versiones tienen algo en común, la causa de este desastre ecológico es la expansión de terrenos buscando adentrarse a la laguna y la contaminación del agua debido a las actividades ganaderas y lecheras cuyos desechos terminan en este cuerpo de agua. En el 2019 fueron invertidos 90 mil millones de pesos para recuperar la laguna. Pero, esto no servirá de nada si no se realiza algún control sobre las empresas de ganadería y lechería que se encuentran en la zona.

Debido a la mala disposición de desechos del ganado la laguna de Fúquene se ha convertido en el lugar donde llega toda la escorrentía de las fincas lecheras de la zona. Debido a este problema, nació la necesidad de disponer de estos desechos de una forma que genere beneficios para los habitantes de la zona.

La solución planteada en el presente proyecto consiste en la utilización de excrementos de ganado como sustrato para un biodigestor, en este se obtiene como producto biogás y como subproducto bioabono.

El bioabono puede utilizarse como fertilizante para el cultivo de forraje, que sirve como alimento para las vacas lecheras del sector. Y el biogás es sometido a un proceso de combustión para la obtención de una corriente rica en dióxido de carbono. El calor desprendido por la cámara de combustión es aprovechado en el proceso y los gases de combustión son inyectados a un fotobiorreactor. De esta forma, se promueve la producción de biomasa de la microalga llamada *Spirulina platensis* que puede ser utilizada como fuente nutricional para los bovinos presentes en el hato lechero.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar teóricamente un sistema autosustentable para la generación de biomasa de uso como alimento vacuno.

Objetivos específicos

1. Realizar el estado del arte de la construcción teórica de un biodigestor para la obtención de metano y un fotobiorreactor para la producción de biomasa.
2. Diseñar un proceso autosustentable para un hato lechero haciendo uso de datos bibliográficos.
3. Establecer las condiciones de operación de manera teórica para el desarrollo del proceso.
4. Determinar los costos de la ejecución del diseño del proceso planteado.

1. MARCO TEÓRICO

Un sistema autosustentable, es una forma de mantener un proceso por medios propios, en donde las materias primas de alimentación vienen de medios externos como residuos de otros procesos que pueden llegar a deteriorar el medio ambiente o afectar la salud humana a largo plazo en la sociedad. Estos residuos dentro del sistema cumplen el propósito de satisfacer los requerimientos energéticos que sean necesarios para la generación la de energía o generación de alimentos. Estos son de gran aprovechamiento para zonas rurales o zonas que tengan disponibilidad de residuos además favorece las técnicas recuperación y reciclado para disminuir la influencia de consumo de recursos naturales o producciones altamente contaminantes. [1]

En la perspectiva del sector agropecuario, la producción de leche cuenta con un sistema especializado que está regido bajo dinámicas de alta producción de leche para la generación de productos lácteos, los procesos productivos en donde se realiza la obtención de la leche se le denomina Hato lechero, lugar en donde a los bovinos se les hace la extracción de la leche, considerando que defecan dentro y fuera del lugar. El excremento o también denominado estiércol de los bovinos es materia orgánica que producen a partir de su digestión y alimentación con variabilidad de composición según la alimentación de los bovinos, puesto que el forraje determina el poco o alto valor para utilizar como sustrato en procesos biológicos para la producción de biogás. [2]

Dentro de los sistemas que actualmente están en líneas tecnológicas que desarrollan procesos renovables para la generación de energía, son los biodigestores que, a partir de procesos naturales biológicos como la digestión anaerobia, utilizan el material orgánico que se le suministra al proceso y es en su totalidad degradado por diferentes grupos de microorganismos anaerobios que producen una mezcla de gases como el metano, el dióxido de carbono, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno. El producto de interés dentro del proceso es el metano, ya que al ser un gas de gran aplicación a nivel global por el suministro energético que ofrece y como fuente de carbono de fotobiorreactores y de igual modo al ser una forma de energía sustentable que gestiona los residuos sólidos. [3]

El aprovechamiento de los residuos orgánicos generados por los bovinos por medio de un sistema de bajo impacto ambiental se logra a partir del biodigestor, este sistema se basa en la digestión anaerobia.

1.1. Biodigestor

Los biodigestores permiten el aprovechamiento de los residuos orgánicos para la obtención de biogás y otros subproductos para luego ser utilizados como energía a otros sistemas por medio de la digestión anaeróbica de las bacterias presentes en el excremento de los bovinos. [4]

En el biodigestor se debe realizar el análisis de dos aspectos fisicoquímicos como son el contenido de sólidos volátiles. Debe estar entre 1 a 6 kilogramos por metro cubico de biodigestor por día y la cantidad de sólidos totales debe estar entre 7% al 9% en masa. [5]. Se debe mantener una agitación leve para evitar dañar las bacterias anaeróbicas y así mismo, para evitar que los operarios tengan un contacto alto con la materia orgánica. [5].

Adicionalmente el rango de temperatura en el que las bacterias anaeróbicas es óptima se encuentra entre 10°A-37°C pues son bacterias mesófilas. Dentro de los macronutrientes que debe contener el biodigestor, como lo son el carbono y nitrógeno, se debe establecer una relación C/N de 20 a 30 como mínimo. [5]

El rango de pH recomendado se ubica entre 6,5 y 7,5.y la temperatura es directamente proporcional a la velocidad metabólica de cada microorganismo, pero se debe garantizar una temperatura entre el rango de 20°-45°C para el tipo de bacterias que están presentes. [5]

Para un ideal crecimiento de las bacterias, se debe tener en cuenta el contenido de micronutrientes para el buen desarrollo de las rutas metabólicas, dentro del biodigestor debe haber una relación de nitrógeno y potasio en N/P=5, y metales como como el sodio, potasio, calcio además magnesio; concentraciones pequeñas de hierro, cobre, cinc, níquel y azufre. [5]

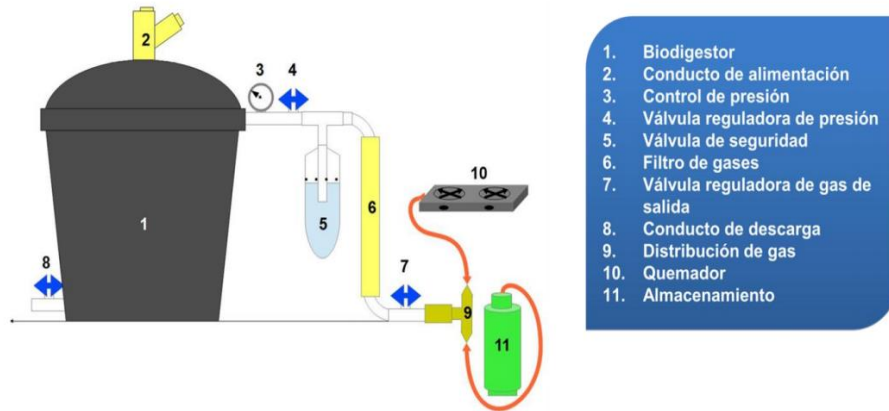
1.1.1. Partes de un biodigestor

Los elementos comunes que tienen todos los tipos de biodigestores para garantizar un correcto funcionamiento a partir de la figura 1 son:

Figura 1

Esquema básico de un biodigestor doméstico.

Gráfica 1. Esquema básico de un biodigestor doméstico



Nota. La figura representa las partes comunes que contienen los biodigestores que existen en la actualidad. Depende del tipo de biodigestor estas partes pueden cambiar e incluso puede haber más. Tomado de: M. S. R. Maulana, “Los biodigestores: Fuente de desarrollo sostenible y calidad de vida en comunidades rurales de Colombia” *Ekp*, vol. 13, no. 3, pp. 1576–1580, 2017

1.1.1.a. El tanque o reactor. Lugar donde ocurre la descomposición de los residuos orgánicos, puede estar construido de diferentes materiales como plásticos en su entorno o cemento alrededor de él. El volumen y tamaño que se disponga se calcula de acuerdo con la cantidad de biogás a producir y almacenar. [6]

1.1.1.b. Sistema de alimentación. Lugar por donde ingresará los residuos orgánicos o sustrato al biodigestor, debe contar con un sistema que no permita la salida del gas generado, así mismo se debe contar con un conducto adicional en caso de que tal de que la materia prima no se encuentre en perfectas condiciones al ingresar. [6]

1.1.1.c. Control de presión. Sistema que permite garantizar la acumulación óptima del gas dentro del reactor o tanque, y en caso de exceso de generación de gas liberar para no dañar el biodigestor y los microorganismos que se encuentran dentro del mismo. [6]

1.1.1.d. Sistema de salida. Válvula que permite un caudal de salida del biogás generado durante el proceso. [6]

1.1.1.e. Sistema de purga: mecanismo que permite la extracción de los residuos orgánicos que se acumulan dentro del proceso. [6]

1.1.2. Tipos de biodigestor

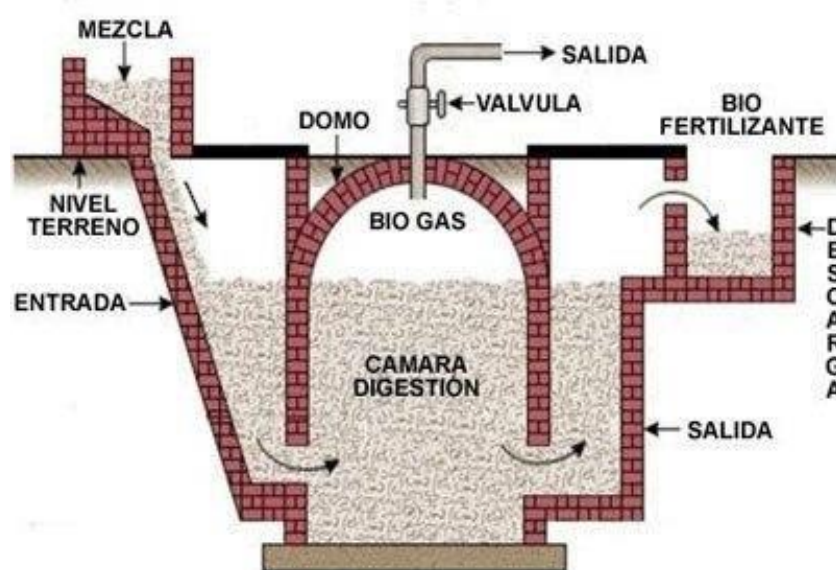
1.1.2.a. Biodigestor de domo fijo. Esta estructura, que se muestra en la figura 2, está conformada por una cámara de digestión con un sistema tradicional de bloques de concreto que resisten altas cargas y un domo fijo que se encuentra cerrado en el que se almacena el biogás. Cuando se está realizando la formación del biogás, el contenido fermentado se encuentra en el tanque de compensación y en el momento que se extrae el gas, la masa retorna al biodigestor. Este tipo de biodigestores no tiene material metálico dentro de él, por lo tanto, la oxidación no es un problema y la presión del gas es variable, al tener este tipo de comportamientos hace que sea una ventaja la durabilidad del dispositivo. Pero, así mismo, la presión debe ser controlada por medio de una cúpula para no permitir que se generen grietas donde se pueda fugar el gas. [7]

Usualmente, este tipo de biodigestores se utilizan en sistemas donde se requiere un flujo continuo de gas que asegure que la presión interna del biodigestor no va a afectar la estructura. De esta forma, se espera que este tipo de sistemas dure hasta 20 años. [8]

Otra ventaja que trae este tipo de diseños es que se protege contra altas temperaturas. Además, no posee en su estructura partes móviles por lo que requiere menos mantenimiento. Por otro lado, los materiales para la construcción inicial deben ser de una calidad alta y, por ende, son costosos. Finalmente, requiere de mano de obra calificada y costosa y mantenimiento sistemático. [8]

Figura 2

Esquema de un biodigestor de domo fijo.



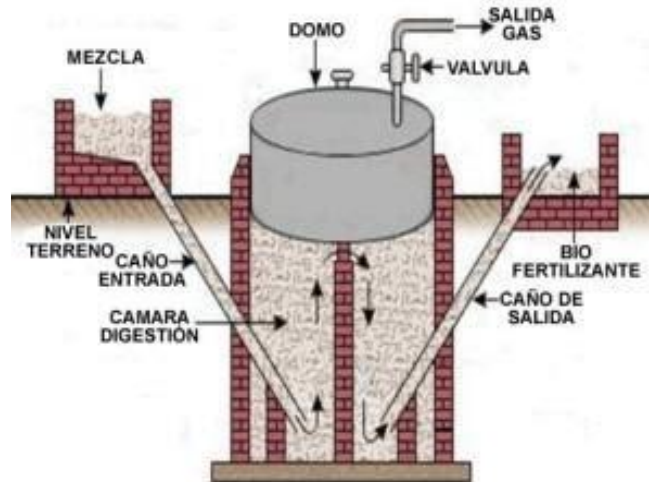
Nota. La figura representa uno de los sistemas más sencillos y con larga vida útil de los biodigestores. Tomado de: Zúñiga, Iván "Biodigestores," *Labour*, vol. 17, no. 2, pp. 299–314, 2003, doi: 10.1111/1467-9914.00232.

1.1.2.b. Biodigestor de domo flotante. Como se muestra en la figura 3, la cámara está construida a partir de concreto o mampostería lo que permite una larga vida útil y un dispositivo de gas que permite un movimiento en forma de campana. Sin embargo, este material requiere de protección con impermeabilizantes, sellantes para líquidos y gases, aislantes térmicos y anticorrosivos lo que se ve reflejado en altos costos de mantenimiento. [8]

Se mueve de tal manera en que la masa fermentada y la producción de gas se esté generando, su movimiento es vertical y tiene un depósito de gas interno, al contener este depósito permite una presión constante dentro de la cámara mitigando la generación de poros o grietas. El movimiento vertical es permitido y controlado por una guía cuya altura depende del volumen esperado de biogás. En algunos casos es necesario el uso de contrapesos sobre la campana para mantener presión constante en el biodigestor. [8]

Figura 3

Esquema de un biodigestor de domo flotante.



Nota. La figura representa un biodigestor con mayor control de la presión y salida de gases. Tomado de: Zúñiga, Iván "Biodigestores," *Labour*, vol. 17, no. 2, pp. 299–314, 2003, doi: 10.1111/1467-9914.00232.

1.1.2.c. Biodigestor de estructura flexible. Como se muestra en la figura 4, está hecho a partir de material de plástico que se encuentra completamente sellado y las salidas están sujetas a las paredes de la planta, su diseño es tubular y se estima que el 75% del volumen debe ser el contenido del residuo orgánico a fermentar y el 25% restante es el biogás producido. Este diseño es el más sencillo de los que existen y más económicos por el diseño, al ser tan sencilla su instalación y el tipo de material hacen que no tengan un tiempo de vida útil largo por ser un sistema que no tiene gran control del gas generado, además la producción de gas es menor. [8]

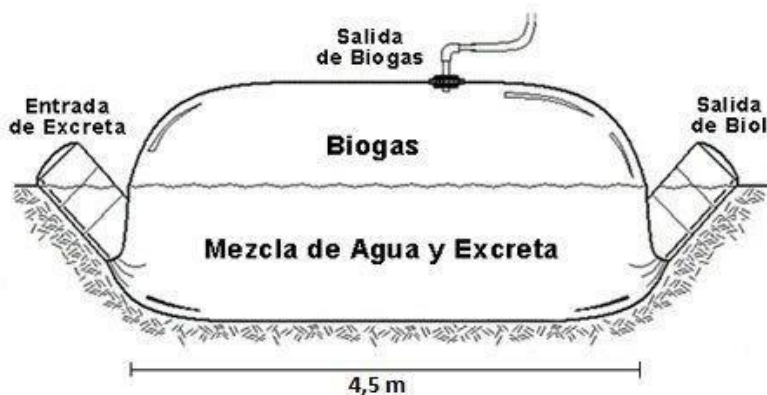
Entre los biodigestores es de los de menor costo de instalación y operación, pero por su forma alargada ocupan una mayor área del terreno. Además, es ideal para cuando debe ser construido en una zona cuyo nivel freático es alto. Se utiliza comúnmente en comunidades con pocos o nulos conocimientos sobre esta tecnología. Tiene aún más ventajas como su resistencia a eventos telúricos, es continuo por lo que la carga y descarga no debe parar su producción de biogás, permite condiciones más flexibles

como, por ejemplo, protección contra bajas temperaturas y correcciones a la presión del gas. [8]

Por otro lado, el gas sale con una presión baja, además su vida útil se encuentra entre los 3 y 8 años dependiendo del material escogido y de la cantidad de rayos solares que le den directamente a la estructura. Por eso, muchos se protegen con techos añadiendo costos de inversión en infraestructura de protección. Si la estructura se encuentra bien protegida se espera que dure hasta 20 años. [8]

Figura 4

Esquema de un biodigestor de estructura flexible.



Nota. La figura representa un biodigestor hecho a partir de plásticos y con pocos sistemas de control. Tomado de: Zúñiga, Iván "Biodigestores," *Labour*, vol. 17, no. 2, pp. 299–314, 2003, doi: 10.1111/1467-9914.00232..

1.1.2.d. Biodigestor de alta velocidad. Son los más avanzados en tecnología, ya que cuentan con un sistema de agitación controlada que permite mayor producción de biogás y distribución de los lodos generados sin dañar la fermentación, esta agitación puede ser manual y contiene un sistema de domo flotante y presión controlada. Así como su tecnología es avanzada, también requiere de personal capacitado para manejar este biodigestor. Además, su inversión inicial es significativamente mayor a la de los biodigestores mencionados con anterioridad.

Sin embargo, son varias las ventajas de este tipo de sistema. El mantenimiento es sencillo y de bajo costo, el tiempo que permanece el sustrato en el sistema es menor por lo que se recomienda para grandes volúmenes de estiércol, gracias a la agitación

desincentiva la formación de costra y la aparición de sustancias tóxicas para el sistema, además, sirve inclusive para la digestión de agua residuales. [8]

1.1.3. Digestión anaerobia

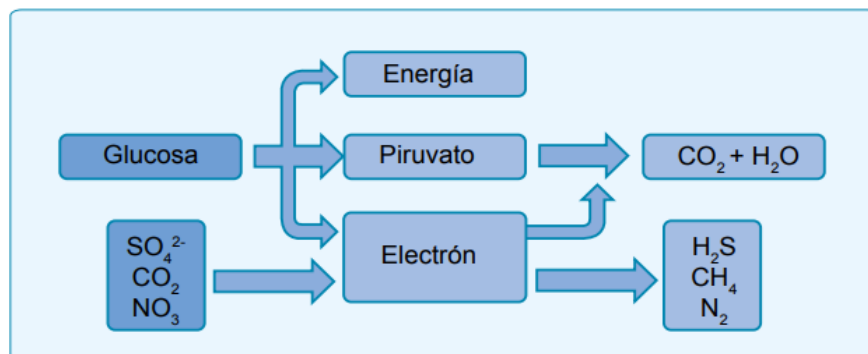
También se le denomina biometanización, se da en condiciones de ausencia de oxígeno a partir de material orgánico que se encuentra en el biodigestor. En este caso, va orientado a las excreciones fecales de los residuos bovinos, estos compuestos son degradados por medio de microorganismos anaerobios y producen una mezcla de gases, en donde el metano y el dióxido de carbono se encuentran en mayor proporción. [9]

1.1.4. Etapas de la digestión anaerobia

El proceso de la digestión anaeróbica es un tipo de respiración que se genera cuando hay presencia de microorganismos que crecen en ausencia de oxígeno. Este tipo de metabolismo obtiene su energía (ATP) a partir de compuestos orgánicos, pero como se puede ver en la figura 5, el aceptor de electrones proviene de otras sustancias inorgánicas, es importante mencionar que los procesos anaeróbicos tienden a producir gran cantidad de CO_2 como productos.

Figura 5

Respiración anaeróbica.



Nota. La figura ilustra el intercambio de electrones dentro de la reacción. Tomado de: FAO, MINENERGIA, PNUD, and GEF, "Manual del Biogás," *Proy. CHI/00/G32*, p. 120, 2011, [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>.

Dentro de las etapas del proceso anaeróbico, son 4 las cuales se hacen presentes:

1.1.4.a. Hidrólisis. Es la primera etapa que ocurre dentro de la digestión anaeróbica, consiste en el rompimiento de macromoléculas o también llamados substratos más complejos, tales como la celulosa, hemicelulosa, lípidos, proteínas. Estos compuestos

se hidrolizan y se convierten en compuestos solubles como lo son las grasas de cadena largas, aminoácidos y azúcares. Por medio de la acción de las enzimas producidas por las bacterias, para cada compuesto generado se encuentra una enzima específica que facilita el rompimiento del compuesto, tales como las lipasas y las proteasas. [9]

1.1.4.b. Acidogénesis. Esta etapa es donde empieza el proceso fermentativo. Por medio de las bacterias acidogénicas, los compuestos solubles se transforman, por medio de la fermentación en ácidos grasos volátiles, produciendo compuestos de bajo número de carbonos como el ácido acético, fórmico, propiónico, butírico y también dióxido de carbono, alcoholes e hidrógeno. [9]

1.1.4.c. Acetogénesis. Los productos generados por la acidogénesis se oxidan a acetatos, hidrógeno y dióxido de carbono, es necesario que todos los parámetros del sustrato estén dentro de los rangos establecidos ya que puede provocar un exceso de producción de hidrógeno y esto puede desencadenar o direccionar la ruta metabólica a desarrollar otros subproductos como el ácido propiónico o ácido butírico en vez de los acetatos que pasarían a la reacción de metanogénesis. [9]

1.1.4.d. Metanogénesis. El acetato generado se transforma, por medio de las bacterias anaerobias estrictas, en metano en mayor proporción y otros gases que lo conforman. Esta reacción es clave para la producción de biogás. [9]

En esta fase de la reacción las bacterias usan el carbono como aceptor final de electrones para la formación de metano como se evidencia en la figura 5. Por lo general en esta fase se produce el 90% de metano y el restante de otros gases que lo complementan, pero así mismo se ha observado que la fase de metanogénesis es la tasa de crecimiento más pequeña, ya que ellas empiezan su crecimiento cuando ha pasado las demás reacciones iniciales. [9]

1.1.5. Microorganismos presentes en la digestión anaerobia

Dentro del biodigestor, el proceso de la digestión anaeróbica cuenta con cuatro partes como se menciona en la tabla 1 de acuerdo a los microorganismos presentes, en donde cada una tiene una reacción química establecida, estas se denominan: hidrolisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis como se muestra en la tabla 1.[9]

Tabla 1

Microorganismos presentes en cada una de las fases.

Fase	Género
Hidrólisis	<i>Bacteroides, Lactobacillus, Propionibacterium, Sphingomonas, Sporobacterium, Megaspheara, Bifidobacterium</i> , entre otros.
Acidogénesis	<i>Clostridium, Paenibacillus y Ruminococcus, Cytophaga Flavobacterium-Bacteroides</i> , entre otros.
Acetogénesis	Las bacterias acetogénicas reductoras de sulfato que degradan el lactato y etanol
Metanogénesis	Especies principales: <i>Methanobacterium, Methanospirillum hungatii, y Methanosarcina</i> .

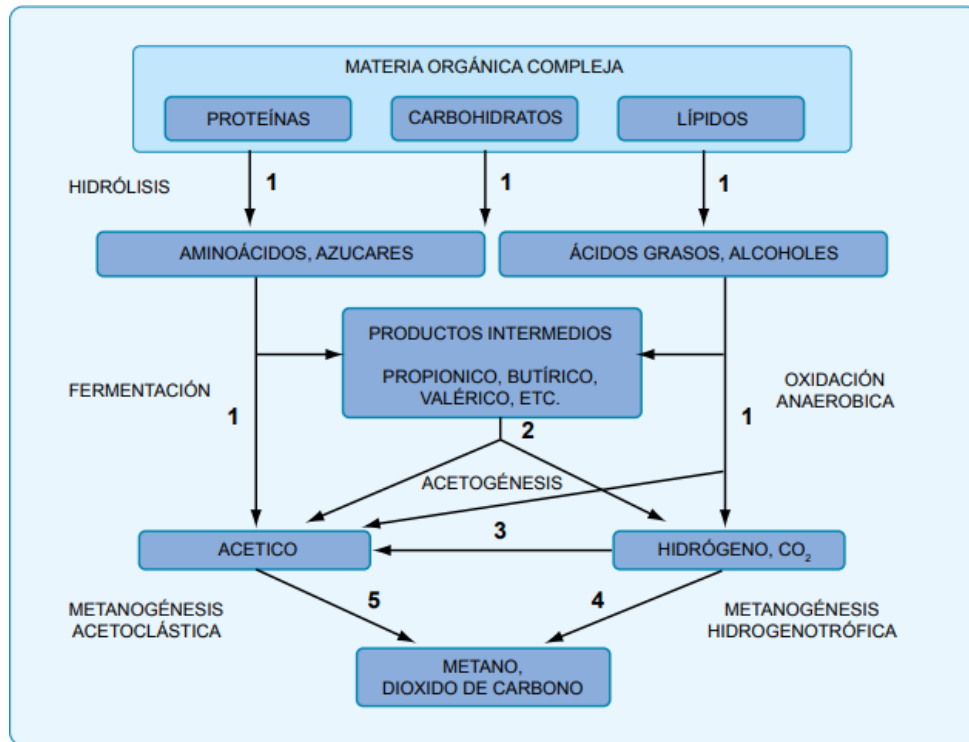
Nota. Esta tabla muestra los microorganismos que se encuentran comúnmente dentro de un biodigestor.

Los microorganismos existentes compiten por sus nutrientes, por ello es clave la identificación en cada una de sus etapas, y la especificación en cada una de las reacciones y tipo de microorganismo que realiza el metabolismo. De manera como se ilustra en la figura 6, se observa que según el macronutriente presente dentro del proceso anaeróbico hay una serie de rutas que prevalecen según los microorganismos que se encuentran, adicionalmente se observan las cuatro fases del metabolismo anaeróbico.

[9]

Figura 6

Reacciones de la digestión.



Nota. En la figura se evidencia los microorganismos implicados en cada una de las reacciones, 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas. Tomado de: FAO, MINENERGIA, PNUD, and GEF, “Manual del Biogás,” *Proy. CHI/00/G32*, p. 120, 2011, [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>.

1.2. Biogás

Cuando la digestión anaeróbica culmina se obtiene como producto bioabono y biogás, este último es una mezcla que se conforma principalmente de metano y dióxido de carbono. El porcentaje restante corresponde a otros gases como sulfuro de hidrógeno (H_2S), amoníaco (NH_3), nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2) entre otros que se ilustran en la tabla 2. [9]

Tabla 2

Componentes típicos del biogás.

Componentes % Vol.	
CO ₂	25-50
H ₂ S	0-0,5
NH ₃	0-0,05
CH ₄	25-50
Vapor de agua	1-5
Polvo	>5 μ m
N ₂	0-0,5
Siloxenos	0-50 mg/m ³

Nota. Esta tabla muestra las composiciones promedio dentro del biogás que se produce en los biodigestores. Tomado de: Pérez, "Pequeños Ganaderos Y Lecheros Mecánico," 2010.

El potencial del biogás se obtiene a partir de la composición, principalmente, de metano, pues contiene enlaces de hidrógeno y carbono formando parte de hidrocarburos alifáticos de los alcanos, funcionando como buen combustible. El metano es incoloro, muy poco soluble en agua, pero es soluble en gasolina o éter. Se pueden evidenciar otras propiedades físicas que caracterizan al biogás en la Tabla 3. [10]

Tabla 3*Propiedades físicas típicas del biogás.*

Propiedades	
Composición	55-70% CH ₄ , 30-45% CO ₂ .
Energía contenida	6,0 – 6,5 kWh/m ³
Equivalente en combustible	0,6 – 0,65 Lpetróleo/m ³ de biogás
Límite de explosión	6 – 12% biogás en el aire
Temperatura de ignición	6 – 12% biogás en el aire
Presión crítica	75 – 89 bar
Densidad	1,2 kg/m ³
Olor	Olor fuerte
Masa molar	16,04 kg/kmol

Nota. La tabla muestra las características más relevantes del biogás. Tomado de: Pérez, “Pequeños Ganaderos Y Lecheros Mecánico,” 2010.

El posible manejo y aprovechamiento del biogás generado por el biodigestor, puede ser la consideración de este como fuente de alimentación para otro proceso, que promueva la economía circular, y es la producción de dióxido de carbono a partir de este biogás por una reacción de combustión con el oxígeno, esto con el fin de alimentar otros procesos.

[10]

1.3. Aprovechamiento del biogás en quemadores

Al hablar del aprovechamiento energético del biogás en quemadores, se habla de una reacción química donde ocurre la oxidación del biogás, para una buena combustión se dice que debe haber como mínimo 21% de aire. De igual forma, la presión adecuada del biogás se encuentra entre los 7- 20 mbar por las características físicas que lo clasifican [11]. Es necesario conocer la dinámica de la combustión del metano como principal constituyente del biogás para identificar qué aspectos controlar como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4

Valores comunes de algunas propiedades de la combustión de biogás.

Propiedad (Unidades)	Valor
Valor calorífico (kWh/ m ³)	7
Densidad (kg/m ³)	1,08
Densidad con respecto al aire	0,81
Límite de explosión (% de gas en el aire)	6-12
Temperatura de encendido (°C)	687
Máxima velocidad de encendido en el aire (m/s)	0,31
Requerimiento teórico de aire m ³	6,6

Nota. Esta tabla muestra los aspectos para tener en cuenta para diseñar un quemador para combustión de dióxido de carbono. Tomado de: P. O. R. La, D. Anaeróbica, D. E. L. A. Materia, and L. A. Hemández, “Tecnologías para el aprovechamiento del gas producido por la digestión anaeróbica de la materia orgánica Technologies for the utilization of gas derived from anaerobic digestion of organic matter,” *Agron. Colomb.*, vol. 13, no. 1, pp. 76–90, 1996.

1.3.1. Características de los quemadores empleados con biogás

Por lo general, estos dispositivos trabajan con presiones entre 50 a 150 mmCA en estufas de 1 a 4 puestos con quemadores circulares de 2 a 10 pulgadas de diámetro [11]. El consumo de biogás (con 55% en volumen de metano) varía según el tamaño de la tobera de descarga del quemador como se ve en la Tabla 5.

Tabla 5

Características de una cámara de combustión.

Diámetro de la tobera(mm)	Consumo(L/h)
2	330
4	470
6	640

Nota. Esta tabla ilustra las dimensiones aconsejables para el diseño de una cámara de combustión. Tomado de: P. O. R. La, D. Anaeróbica, D. E. L. A. Materia, and L. A. Hemández, “Tecnologías para el aprovechamiento del gas producido por la digestión anaeróbica de la materia orgánica Technologies for the utilization of gas derived from anaerobic digestion of organic matter,” *Agron. Colomb.*, vol. 13, no. 1, pp. 76–90, 1996. Para adaptar un quemador doméstico comercial a un quemador de biogás, es necesario ampliar el diámetro de las toberas de descarga de gas y la del flujo de aire primario, en función de la densidad del biogás máxima. Se puede realizar el diseño de inyectores y válvulas que garanticen una mezcla y combustión adecuadas, las variaciones de presión, la presencia de materiales inertes durante la generación y aprovechamiento del biogás, no justifican dimensiones perfectas. [11]

Para los quemadores industriales de más de 2 kW, se necesitan mayores presiones de suministro de biogás, (500 a 2.000 mmCA) y también se deberá ampliar hasta 2mm la boquilla de descarga de biogás, la cual es más grande en comparación con los quemadores que operan con gas comercial. Otros quemadores industriales tipo tubular con medidas de un metro de longitud y 1 in de diámetro, funcionan con presiones de gas dentro del reactor desde 60mmCA, calentando a una temperatura de 75°C aproximadamente 1.200 litros de agua para el escaldado (pelado) de porcinos. [11]

1.3.2. Problemas comunes de los quemadores de biogás

Entre los problemas que se pueden presentar en los quemadores de biogás se encuentra:

1.3.2.a. Cuando la llama es débil y se extingue porque se baja la velocidad del gas en la tobera. Esto se puede solucionar aumentando el diámetro del inyector. [11]

1.3.2.b. Cuando se presentan manchas amarillas en la llama, las cuales son generadas

por el déficit de aire primario, se podría solucionar ampliando la entrada de este aire. [11]

1.3.2.c. Cuando la llama es muy pequeña, es generada por el déficit del combustible, que se podrá solucionar limpiando el orificio de inyección que posiblemente se encuentra obstruido. [11]

1.3.2.d. Cuando la llama se despega del quemador, se da por la alta presión y velocidad del gas, se puede controlar reduciendo la entrada de aire primario. [11]

1.4. Fotobiorreactor

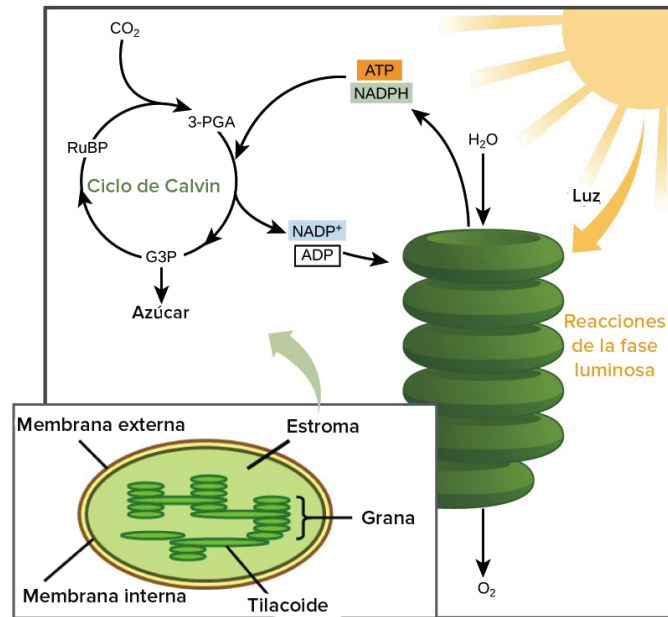
1.4.1. Reacciones

El dióxido de carbono, generado por la combustión de metano, suele ser capturado o almacenado. En la biotecnología es de gran uso potencial para las microalgas, ya que estas cuentan con la capacidad de alimentarse a partir de dióxido de carbono y de la radiación para el aumento de su velocidad de crecimiento. Los fotobiorreactores consisten en un reactor específicamente para el cultivo de microorganismos autótrofos como las microalgas. Estas son un tipo de organismo que tienen la capacidad de fijar el dióxido de carbono, convirtiéndolo biomasa orgánica a partir de la fotosíntesis. Este sistema posee un alto rendimiento fotosintético, mucho mejor que otros sistemas de cultivos terrestres. Y, al requerir de una demanda alta de fuente lumínica, se desarrollan reactores cerrados para garantizar mayor producción de la biomasa. [12]

En la primera etapa se observan reacciones lumínicas, en donde las microalgas absorben la luz para realizar la oxidación del agua. Se produce el agente oxidante NADP⁺ que luego se reduce a NADPH, como consecuencia tenemos la liberación del O₂[13], como se observa en la figura 7.

Figura 7

Ciclo de Calvin.



Nota. En la figura se ilustra la fotosíntesis que realiza las microalgas para metabolizar el dióxido de carbono. Tomado de: R. Giraldo, "Evaluación de cepas de microalgas para captura de CO_2 ," 2013.

Dentro del ciclo de Calvin ocurren varias reacciones, que se subdividen en tres etapas fundamentales: fijación de carbono, reducción y regeneración de la molécula de partida.

1.4.1.a. Fijación de carbono. El dióxido de carbono se mezcla con otra molécula de cinco carbonos, ribulosa-1,5-bisfosfato (RuBP) que luego se subdivide en dos moléculas de tres carbonos, ácido 3-fosfoglicérico (3-PGA). Esta reacción es catalizada por la enzima RuBP carboxilasa/oxigenasa. [13]

1.4.1.b. Reducción. El ATP y NADPH se transforman en 3-PGA, gliceraldehido-3-fosfato (G3P) para luego reducirlo a un intermediario de G3P. [13]

1.4.1.c. Regeneración. Las moléculas generadas a partir de la reducción se destinan a la producción de glucosa, mientras otras se reciclan para cumplir la función de aceptor. [13]

1.4.2. Microalgas

Dentro de la etapa de reducción de dióxido de carbono, las microalgas también denominados microorganismos fotosintéticos, tienen la capacidad de utilizar el CO₂ como fuente de energía. Por lo general ellas miden entre 1 a 50 micras de diámetro y tiene alta capacidad de adaptación en condiciones ambientales como son la temperatura, el pH y la salinidad, así mismo tienen altas tasas de crecimiento y elevada producción en lo que respecta la biomasa. Dentro de las especies que contempla todas las microalgas, por lo general todas tienen alta fijación de CO₂, en la tabla 6 se ilustra los tipos de microalgas que se han estudiado para el suministro de dióxido de carbono y cuales presentan mayor tolerancia. [14] .

Tabla 6

Especies de microalga y su tolerancia máxima de CO₂.

Especie	Tolerancia Max. De concentración CO₂
<i>Cyanidium caldarium</i>	100%
<i>Scenedesmus sp.</i>	80%
<i>Chlorococcum littorale</i>	60%
<i>Synechococcus elongatus</i>	60%
<i>Euglena gracilis</i>	45%
<i>Chlorella sp.</i>	40%
<i>arthrospira platensis</i>	40%
<i>Eudorina sp.</i>	20%
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	15%
<i>Nannochloris sp.</i>	15%
<i>Chlamydomonas sp.</i>	15%

Nota. En la tabla se muestra la variedad de microalgas que tienen mejor adaptación en presencia de dióxido de carbono. Tomado de: OLIVIA BERTHA, “Concentración, recuento celular y tasa de crecimiento.”

Dentro del grupo de microalgas, para el desarrollo del proyecto realiza a partir del alga *Arthrospira Platensis*, también denominada alga azul, sus células miden 3,5-10 μ m, tiene un filamento en forma de espiral que posee un arreglo multicelular de tricomas cilíndricos con hélice[15] como se muestra en la figura 8.

La microalga tiene la capacidad de almacenar carotenos que previenen de la oxidación en situaciones de estrés celular.[16] Adicionalmente es un alimento que tiene grandes beneficios para el metabolismo de los bovinos tanto como para los humanos por la cantidad de vitaminas tipo B que la componen. [16]

Figura 8

Estructura de Arthrospira Platensis.



Nota. En la figura se observa una microalga con buen desempeño en condiciones extremas de cultivo. Tomado de: P. Batista, "Comparison of microalgal biomass profiles as novel functional ingredient for food products," *Algal Res.*, vol. 2, no. 2, pp. 163–173, 2013, [Online]. Available:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211926413000210>.

1.4.3. Parámetros de diseño de un fotobiorreactor

Los factores que garantizan las condiciones ideales, como la temperatura, el pH, la radiación, la agitación y el tamaño del reactor determinan el crecimiento de las microalgas y, por ende, la producción de biomasa.[17]

1.4.3.a. Temperatura. Esta variable, se encuentra directamente relacionada con el crecimiento, si no está dentro del rango puede inhibir a las microalgas. Al manejar un fotobiorreactor el control de la temperatura es mucho más sencillo porque es un sistema cerrado que maneja un rango entre 15-35°C y para que el crecimiento sea óptimo es a 25°C. Para este control de la temperatura se realiza con la integración de un calentador, un sistema común son los denominados intercambiadores de calor en estructura tubular que permita el uso de bulbos incandescentes.[18]

1.4.3.b. pH. El rango óptimo varía de acuerdo con el tipo de microalga que se utilice, por lo general se trabaja con un medio alcalino entre 7-10, pero dentro de las condiciones más ideales se establece un rango más corto entre 8,2-8,5. [18]

1.4.3.c. Agitación. Un factor clave para lograr una distribución homogénea de los nutrientes y control sobre la luz que se le suministra al sistema. Un correcto mezclado garantiza que no se generen zonas muertas dentro del reactor y sedimentaciones. El flujo de inyección de aire enriquecido de dióxido de carbono en forma de burbujeo que previamente fue quemado se alimenta por bombeo se maneja entre 20-50 cm/s. No es recomendable manejar altas velocidades porque puede llegar a dañar las microalgas. [18]

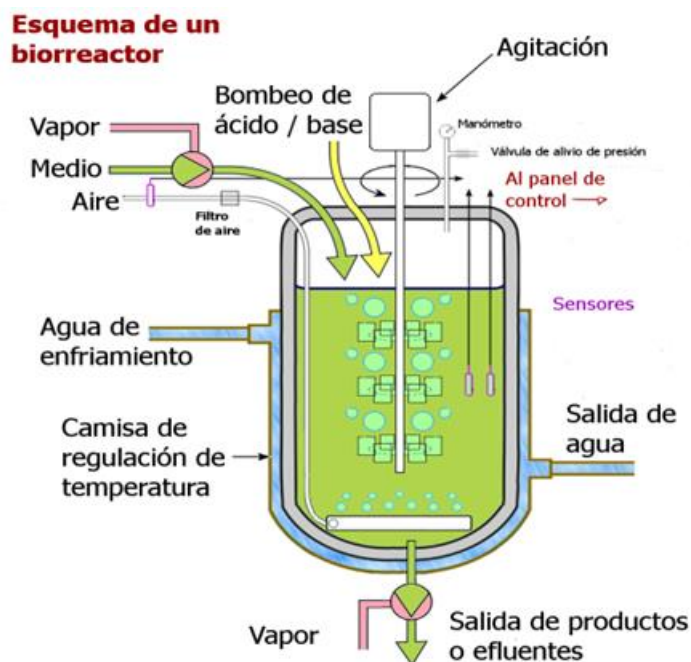
1.4.3.d. Luz. Los fotobiorreactores tienen la gran ventaja de un correcto manejo de la radiación evitando el daño de la pared celular y la fotoinhibición de las microalgas por el exceso. La manera en que los reactores producen está cantidad de luz es por medio de unos bulbos incandescentes también lámparas halógenas, bombillos LED. Todos estos equipos se recomiendan que deben estar dentro de un rango de longitud de onda entre 400-700nm. [18] Sin embargo, la Spirulina permite mayor flexibilidad a la hora de escoger una fuente de luz, esta puede ser solar.

1.4.4. Tipos de fotobiorreactores

En los sistemas de cultivos existentes en la actualidad, se clasifican de dos maneras: sistema cerrado y sistema abierto. El sistema cerrado, como su nombre lo dice, se encuentra totalmente aislado del medio ambiente, este sistema es mucho más eficiente, ya que permite el control de las variables del proceso como se observa en la figura 9, como son la agitación, la variación de pH, la radiación, la temperatura, ejercer la agitación necesaria según la capacidad interna y, además, menor riesgo de contaminación proporcionando mayor productividad y eficiencia en la producción del metabolito de interés. En cambio, el sistema abierto es mucho más propenso a variación de parámetros específicos para que la microalga se reproduzca.[19]

Figura 9

Esquema de un biorreactor convencional.



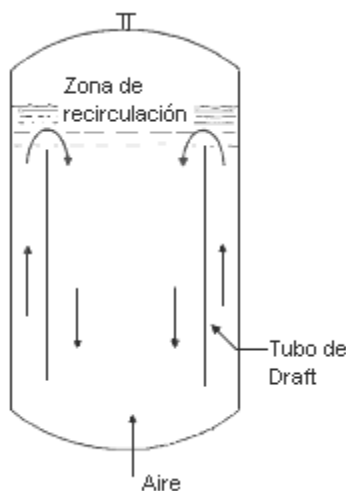
Nota. La figura muestra un esquema convencional de un biorreactor de microalgas. Tomado de: Pedraza C, "Evaluación de la biofijación de CO₂ y producción de biomasa a partir de las microalgas bajo condiciones de fotobiorreactor escala laboratorio," 2018. Dentro de los fotobiorreactores con sistema cerrado se caracterizan diferentes diseños según sean las condiciones específicas de control de las microalgas. Entre los diseños

más comunes existen cuatro tipos: columna, reactores planos, reactores airlift y tubulares.

1.4.4.a. Columna. Consta de un sistema de burbujeo, en donde las variables de diseño son la altura y el diámetro de la columna. Es un sistema en donde la luz se distribuye de manera vertical uniforme como se muestra en la figura 10, aunque no se recomienda para volúmenes altos, ya que, al aumentar el diámetro de la columna, no permite que la radiación llegue hasta la parte interna del reactor, tiene mayor probabilidad de formar zonas oscuras donde no se realizaría la fotosíntesis. El sistema de agitación es el burbujeo, por lo general estos sistemas cuentan con una recirculación interna para distribuir mejor los nutrientes que se encuentran dentro del reactor. [12]

Figura 10

Esquema reactor en columna.



Nota. La figura ilustra el diseño más convencional de los reactores con microalgas.

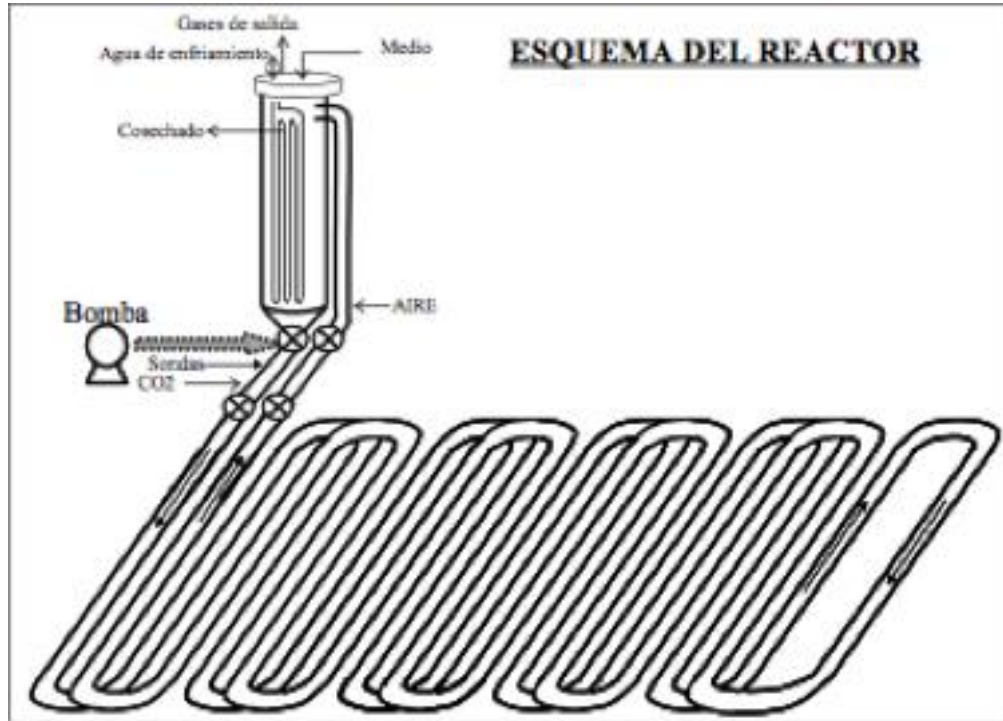
Fuente: M. Sandoval, "Disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) en vinazas mediante tratamiento biológico". [Online] 2006. Available:http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/9962.pdf

1.4.4.b. Reactor plano. Sistema similar a la columna, pero la diferencia es que el paso óptimo se incrementa, debido a que la longitud se incrementa sin afectar el diámetro. Este diseño, que se observa en la figura 11, permite abastecer el requerimiento de energía lumínica porque se puede posicionar para que tenga un mayor perfil hacia la luz. El diseño comúnmente es de tubos largos que pueden deteriorarse por la variabilidad de

presión.[20]

Figura 11

Esquema de reactor plano.

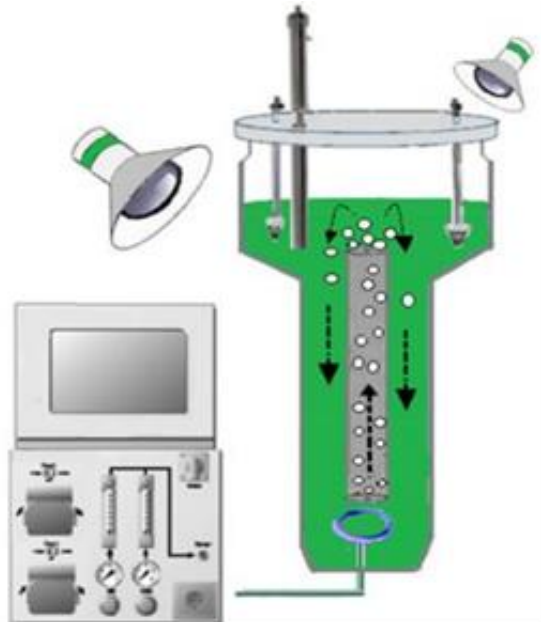


Nota. La figura muestra la estructura de un reactor que tiene mayor influencia de la radiación. Tomado de: L. Ramirez, "Photobioreactor tool for mass cultivation of cyanobacteria," vol. 6, pp. 9–19, 2019, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/292144553_PHOTOBIOREACTOR_TOOL_FOR_MASS_CULTIVATION_OF_CYANOBACTERIA/citation/download.

1.4.4.c. Reactor airlift. Las columnas de burbujeo tienen recirculación interna producido por la inyección de aire con dióxido de carbono. La recirculación está controlada de manera neumática y cíclica con un comportamiento del flujo ascendente y descendiente. Es sencillo, como se observa en la figura 12, pues no tiene en su estructura un agitador, pero el sistema de burbujeo garantiza un buen mezclado.[20]

Figura 12

Esquema de reactor airlift.

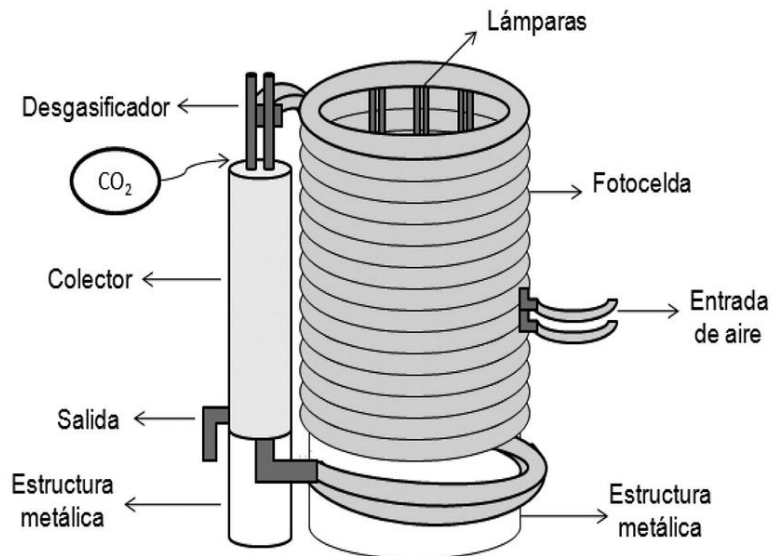


Nota. La figura muestra un reactor mucho más controlado por métodos neumáticos, se considera uno de lo más costosos. Tomado de: M. D. M. Carvajal-Oses, J. Chacón-Guzmán, and Á. Herrera-Ulloa, “Optimización en la producción de la microalga marina *Nannochloropsis oculata* en un fotobiorreactor tubular helicoidal,” *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 31, no. 2, p. 117, 2018, doi: 10.18845/tm.v31i2.3629.

1.4.4.d. Tubular. Dentro de los diseños este es el más especializado y costoso, se divide en dos partes fundamentales: lazo y gasificador. El lazo es la parte en donde la energía solar es captada sin necesidad de hacer ninguna transferencia de materia o calor, además este diseño permite que la fotosíntesis sea más eficiente porque se distribuye de mejor manera la radiación por los codos. En el gasificador es donde ocurre la transferencia de oxígeno, pero eso mismo puede llegar a ser un problema en la acumulación dentro de los tubos. Este sistema tiene un alto consumo de energía y se observa en la figura 13.[21]

Figura 13

Reactor tubular helicoidal.



Nota. Esta figura muestra uno de los reactores más eficientes que desarrolla el mejor crecimiento de microalgas. Tomado de: M. D. M. Carvajal-Oses, J. Chacón-Guzmán, and Á. Herrera-Ulloa, "Optimización en la producción de la microalga marina *Nannochloropsis oculata* en un fotobiorreactor tubular helicoidal," *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 31, no. 2, p. 117, 2018, doi: 10.18845/tm.v31i2.3629.

1.4.4.e. Tanques de canalización o Raceway ponds. Pueden ser abiertos o cerrados, teniendo consideración la contaminación a la que puede estar expuesto el sistema. Los sistemas abiertos pueden ser circulares, con inclinación e incluso estanques naturales. Sin embargo, el más utilizado es el tanque de canalización (Raceway ponds) y son los más utilizados comercialmente como se muestra en la figura 14.

Las dos empresas más importantes de producción de *Spirulina* se encuentran en California (Earthrise) y Hawái (Cyanotech). Estas utilizan esta estructura para el cultivo de *Spirulina*, sin embargo, tienen la desventaja de la pérdida de agua por evaporación y un bajo control de la temperatura. [22]

Figura 14

Tanques de canalización de las empresas Earthrise y Cyanotech.

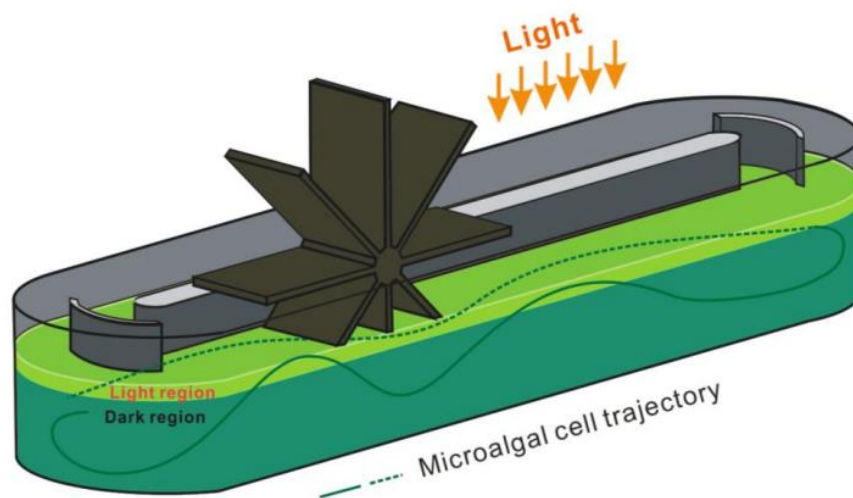


Nota. Estas son unas de las dos empresas más importantes en producción de la *Spirulina platensis* que utilizan tanques de canalización. Tomado de: R. Henrikson, “Development of a Spirulina Industry — Production,” *Special Report: Spirulina Part 5*, 2011.

A pesar de la posible contaminación y del bajo control de temperatura, se utilizan debido a que la *Spirulina* es un microorganismo que no es tan sensible a la contaminación principalmente porque es un alga que está genéticamente adaptada a condiciones donde hay otro tipo de organismos. Además, la presencia de sal en estos tanques impide altos niveles de contaminación. Por medio de la figura 15, se observa el sistema de funcionamiento del tanque, donde se contempla los sistemas de agitación para generar turbulencia, de igual manera se observan la zona oscura y la zona de luz.

Figura 15

Imagen esquemática del funcionamiento de un tanque de canalización.



Nota. El tanque posee una turbina que permite una turbulencia que impide que ciertas algas tengan más radiación que otras, así como puntos muertos en el tanque. Tomado de: Z. Chen, X. Zhang, Z. Jiang, X. Chen, H. He, and X. Zhang, "Light/dark cycle of microalgae cells in raceway ponds: Effects of paddlewheel rotational speeds and baffles installation," *Bioresour. Technol.*, vol. 219, pp. 387–391, 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.07.108.

2. GENERALIDADES E INFORMACIÓN DEL HATO LECHERO

2.1. Identificación de las razas y la capacidad

La presente tesis se basa en la información presentada en uno de los antecedentes titulado Plan de negocio Hato de producción lechera en una Vereda llamada Nemoga que tiene la mayor extensión dentro del municipio de Fúquene. Este proyecto, realizado por la Universidad Externado, especifica las condiciones del hato lechero Doña Rosalba ubicado en los alrededores de la Laguna de Fúquene.

El hato tiene un tamaño de 100 hectáreas, 96 de estas destinadas al pastoreo y los 4 restantes para la producción de leche, por lo tanto, se espera que el biodigestor a realizar se base en el excremento recogido únicamente en las hectáreas destinadas a la producción lechera. Además, en el hato habrá una ocupación óptima de 280 cabezas de ganado que serán del cruce de raza Jersey y Holstein.

En esta zona, se espera que haya una ocupación de 50 vacas para realizar el ordeño total de estas en 1 hora, cada vaca estaría en la máquina de ordeño por 20 minutos máximo. También, se dispondrán 2 dos máquinas de ordeño rotativas y cada vaca será ordeñada dos veces al día; como los grupos de bovinos son de 70 cabezas; se espera que 50 de ellas se destinen a ordeño y las otras 20 para la alimentación de las crías que permanezcan en el hato.

Como tal, el hato tiene un horario sobre lo que realizará con el ganado cada día, se espera que en las primeras horas de la mañana se realice el ordeño inicial en grupos de 50 vacas, posterior a esto, los animales pastarán en 4 grupos de 70 vacas y al medio día serán alimentadas con un complemento dietario.

Luego, volverán al pastoreo para finalmente ser ordeñadas en las últimas horas de la tarde. Finalmente, todas tienen un espacio en establos para pasar la noche.

Hay que tener en cuenta que no todas se encontrarán en producción de leche pues se estima que el tiempo de lactancia de un bovino de estas especies, son 12 meses continuos con 3 meses de descanso para volver a quedar preñadas. Sin embargo, no se tendrá esto en cuenta pues de igual forma estas seguirán produciendo los excrementos que alimentarán al biodigestor.

2.2. Caracterización de las condiciones ambientales

La investigación para el desarrollo del presente proyecto se realizó a partir de la problemática ambiental de los alrededores de la Laguna de Fúquene, que hoy es apenas un pequeño segmento comparado a lo que era hace unos 20 años. Este lago está limitado a sus alrededores por potreros que se dedican a la ganadería y producción de leche.

Con el transcurso del tiempo, ha variado la amplitud y características del cuerpo de agua. Actualmente es poco profunda, pero acumula grandes cantidades de materiales como las arenas, limos y bastante residuo de procedencia bovina.

En la tabla 7 se ilustra la ubicación geográfica en la que se encuentra esta granja lechera, adicionalmente en la figura 16 se logra observar el cuerpo de agua llamado Laguna de Fúquene y sus alrededores. Este lugar cuenta con unas características del clima entre los 13°C-16°C, así mismo se considera que el lugar se encuentra en una zona alta según el nivel del mar como se muestra en la tabla 8.

Tabla 7

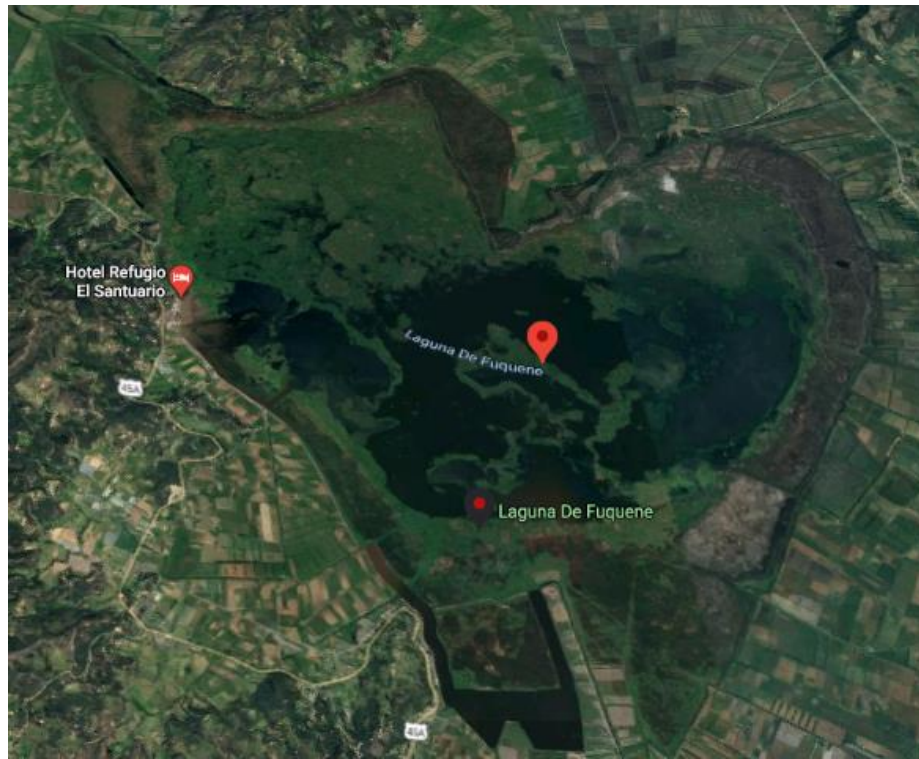
Ubicación geográfica de la vereda Nemoga.

Latitud	5°26'58'31
Longitud	74°45'23'60

Nota. Información sobre latitud y longitud. Tomado de: Google, “Laguna de Fúquene.”

Figura 16

Mapa satelital de la laguna de Fúquene.



Nota. Área total de la laguna de Fúquene. Tomado de: Google Maps. Vereda Nemoga. Disponible en: <https://www.google.com/maps/search/vereda+nemoga+cerca+de+F%C3%BAquene,+Cundinamarca/@5.4143454,-73.8368622,12z/data=!3m1!4b1>

Tabla 8

Condiciones climáticas de la vereda Nemoga.

Condición	Valor
Temperatura media	13°C
Altitud	2750 m.s.n.m.
Humedad relativa media (HR _M)	65-75%

Nota. Características climáticas de la zona alrededor de la laguna de Fúquene. Tomado de: Foreca, “Tiempo y temperaturas.”

2.3. Estimación de las excretas

Para poder realizar el cálculo, diseño, estimaciones, entre otros, dentro del biodigestor, es necesario contar con algunos datos iniciales. Se recomendaría que estos datos fueran

experimentales, sin embargo, para fines teóricos es necesario hacer algunas suposiciones basadas en artículos con escenarios similares y considerar ecuaciones obtenidas por datos experimentales previos o desarrollos conjeturados. Esta información nos permitirá obtener algunas características cuantificables del sustrato a utilizar para la fermentación.

Inicialmente, es necesario estimar el flujo de sólidos totales ingeridos. Este valor depende del peso de la vaca, el % de grasa esperado de la leche, la cantidad de leche a ordeñar por día y las semanas de lactancia. A partir de estos datos, se puede calcular la cantidad en kilogramos de sólidos totales al día y por vaca que deben ingerir los bovinos por medio de la siguiente ecuación 1:

Ecuación 1

$$J_{ST,ING,N} = 0.372 * FCM + 0.0968 * BW^{0.75} * (1 - e^{(-0.192*(WOL+3.67))}) \quad (1)$$

, donde

WOL= semanas de lactancia [semanas]

BW= peso [kg]

FCM=Porcentaje de grasa en la leche corregida [kg/día]

$$J_{ST,ING,N} = \text{Masa de materia seca ingerida} \left[\frac{kgST}{N. día} \right]$$

La ecuación se utiliza en el campo de la zootecnia y no posee incertidumbre debido a que no es experimental. Sin embargo, se recomienda medir también, de forma experimental, la cantidad de sólidos ingeridos para tener un porcentaje de error. [23]

Para obtener la información requerida primero se considerará el valor del FCM el cual corresponde al porcentaje de leche con grasa corregida. Es necesario saber cuánta grasa tiene la leche.

En Colombia, la leche entera más consumida es la de Colanta [24]. Esta tiene 6 gramos de grasa por 200 mL [25]. Considerando que la densidad de la leche tiene valores entre 1,028 g/ml y 1,042 g/mL [26], se considera su promedio para calcular el % de grasa en la leche o %FAT, aunque primero es necesario saber cuánta grasa tiene la leche y esto se puede observar en la ecuación 2.

Ecuación 2

$$\rho_{promedio} = \frac{1.028 + 1.042}{2} = 1.04 \frac{g}{mL} \quad (2)$$

$$200mL * \frac{1.035g}{1 mL} = 207 g, \text{ en } 207 \text{ gramos de leche hay } 6 \text{ gramos de grasa}$$

$$\%FAT = \frac{6g * 100\%}{207g} = 2.89\%$$

Teniendo este valor, se puede calcular el FCM se usa en diferentes estudios de zootécnica y se calcula con la siguiente ecuación 3:

Ecuación 3

$$FCM = (0.4 * L_{Prodxcabeza}) + (0.15 * L_{Prodxcabeza} * \%FAT) \left[\frac{kg}{día} \right] \quad (3)$$

$$L_{Prodxcabeza} = \text{Litros producidos por bovino} \left[\frac{Lt}{día * N} \right]$$

$$\%FAT = 2.898\%$$

Reemplazando estos valores:

$$FCM = (0.4 * 50L) + (0.15 * 50L * 2.898\%) \left[\frac{kg}{día} \right]$$

El FCM se calcula con una base de cálculo que estipula que la leche tiene un 4% de grasa. La corrección se hace teniendo en cuenta que en el hato espera producir 50 litros de leche al día por cabeza de ganado. Por lo tanto, en este caso el FCM nos da un valor de 20.27 kg/día. [27]

$$FCM = 20,217 \left[\frac{kg}{día} \right]$$

Para determinar la materia seca ingerida, inicialmente, se tiene en cuenta un peso (BW) de 550kg por cada vaca. Esto se debe a que el objetivo en el Plan de negocio especifica que cada animal debe tener un peso entre 500 y 600 kg. Por lo tanto, se promedian estos valores para obtener un solo dato.

Para las semanas de lactancia (WOL) se estima un valor de alrededor de 26 semanas durante las que el bovino producirá leche. De tal manera, el valor correspondiente a la cantidad de materia seca que ingiere cada bovino es de 18,45 kgST/N*día a partir de la ecuación 1, siendo ST las siglas de sólidos totales.

Finalmente, para tener valores totales del proyecto, se considerarán las 280 cabezas de ganado que se esperan para cuando el hato lechero llegue a un equilibrio de producción.

Teniendo en cuenta esta información se obtienen los siguientes valores compilados en la tabla 9:

Tabla 9

Variables y parámetros para el cálculo del flujo de sólidos totales ingeridos.

Abreviaturas	Descripción	Valor	Unidades
FCM	Grasa de la leche corregida	20,22	kg/día
L Prod x cabeza	Litros producidos por bovino por día	50	L/N.día
Jst, ING, N	Flujo de sólidos totales ingeridos por bovino por día	18,45	KgST/N.día
N	Número de vacas	280	Vacas
BW	Peso de la vaca	550	Kg
WOL	Semanas de lactancia	26	Semanas

Nota. La información de esta tabla permite tener un valor para caracterizar la materia prima inicial que es las excretas de ganado.

Se debe tener en cuenta que dentro de las variables de la ecuación se pueden presentar varios errores, al tratarse de un gran número de bovinos que presentan diferentes tipos de metabolismo y otros factores naturales. Dentro de las variables que varían según el hato lechero, las características esperadas de la leche, la vaca como tal, son el porcentaje de grasa en la leche y las semanas de lactancia.

El porcentaje de grasa en la leche es un valor que determina la calidad de la leche. En el análisis financiero que se le realizó al Hato Lechero Doña Rosalba, se determinó que la leche sería vendida a Colanta. Fue esta la razón por la cual se utilizaron los datos de la empresa para calcular un porcentaje de grasa esperado acorde a lo requerido en Colanta.

Sin embargo, este porcentaje se ve afectado por múltiples factores, como, por ejemplo, la alimentación de los bovinos, ya que muchos, a pesar de que se le suministra una dieta en común, puede que el consumo sea variable, es decir, que consuman más de la cuenta o menos. Adicionalmente el peso de los bovinos se ve afectado por la genética y el porcentaje de digestibilidad. [28]

Otra variable es la semana de lactancia, donde se puede llegar a tomar un valor promedio entre 42-52 semanas de lactancia, pero es un factor variable porque depende del momento postparto en el que esté el bovino. [29]

Posteriormente, es posible calcular el flujo de sólidos totales excretados. Para ello se considera la siguiente ecuación 4:

Ecuación 4

$$J_{ST,EXC,N} = J_{ST,ING,N} * (1 - \%DIG) \quad (4)$$

$J_{ST,EXC,N}$

= Flujo de sólidos totales excretados al día por cabeza de ganado dado en $\left[\frac{kgST}{N. día} \right]$

$$J_{ST,ING,N} = 18,453 \left[\frac{kgST}{N. día} \right]$$

$\%DIG = Digestibilidad \text{ de la masa ingerida}$

Para esto se debe considerar el porcentaje de digestión, por lo cual este dato indica la cantidad de energía bruta consumida por la vaca que ha sido capaz de digerirse y no sale en forma de excremento. Usualmente se determina de forma experimental, sin embargo, se sabe que para el ganado que se alimentan principalmente de pasturas o forraje la digestibilidad se encuentra entre el 55% y el 75% [30].

Esto depende principalmente de la alimentación, metabolismo y su porcentaje de materia orgánica, proteínas y fibra, debido a que la mayor limitante del biodigestor es su capacidad, se considerará que la digestibilidad es el promedio, es decir 65%. Por lo tanto, se espera la media de cantidad excretadas.[30].

Ecuación 5

$$J_{ST,EXC,N} = 18,453 * (1 - 65\%) \left[\frac{kgST}{N. día} \right] = 6,458 \left[\frac{kgST}{N. día} \right] \quad (5)$$

Así, considerando un número de 280 cabezas de ganado otorgada por la información del Plan de Negocio y mencionada en el capítulo 1.1. Se obtiene la siguiente cantidad de excretas totales por día:

$$J_{ST,EXC} = 1.808,345 \left[\frac{kgST}{día} \right]$$

De igual forma, es necesario considerar el tiempo de permanencia de las vacas en las diferentes zonas dentro del hato lechero puesto que la recolecta del estiércol no puede darse en lugares pastosos o con arenas pues afecta el diseño del biodigestor disminuyendo la eficiencia del sistema, por ello se recomienda que las zonas de recolecta del material seco sea en la zona de ordeño y la zona del establo [23], puesto que los suelos comúnmente están elaborados de hormigón que facilitan la recolección.

Para determinar la carga de materia seca recolectable por estas zonas, se debe utilizar la información del Plan de Negocio mencionada en el capítulo 5.2.2 donde establece los tiempos que van a estar dentro el Hato lechero.

Tabla 10

Distribución horaria en las zonas del Hato lechero.

N° de vacas (N)	Cantidad de veces de ordeño por bovino	Tiempo en la zona de ordeno (h/día)	Tiempo en establo (h/día)	Otros (h/día)
280	2	4	4	16

Nota. El tiempo que debe tener en cuenta es el de tiempo en la zona de ordeño y tiempo en el establo.

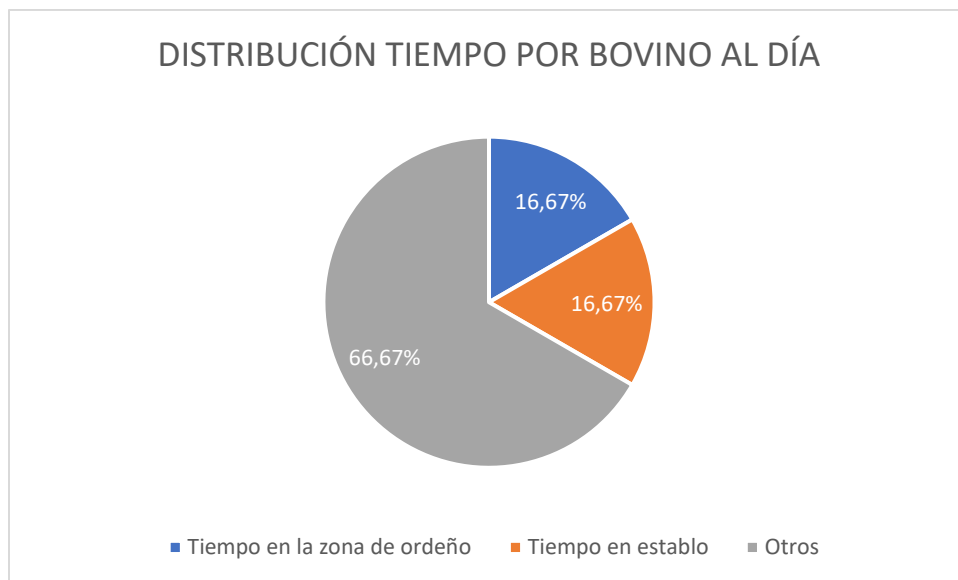
La razón por la que se determinó que el tiempo en el establo es de 4 horas es porque allí es donde duermen y a su vez no se alimentan en la noche, por lo que se estima que la cantidad de excremento para ese periodo de tiempo es equivalente a 4 horas en el día. De igual manera, el tiempo por ordeño es de aproximadamente 20 minutos según la información del plan de negocio.

Sin embargo, se tiene en cuenta que en media hora se dispondrán de las cabezas de ganado para su alistamiento en la sala de ordeño, media hora más se gastará en sacarlas de allí y deben pasar en grupos por lo que se espera a que se ordeñe a todo el grupo. Así que, ya que son dos ordeños en el día, se espera que cada bovino se encuentre por 4 horas diarias en la sala de ordeño.

Finalmente, la columna de otros representa principalmente el tiempo de las vacas pastando o haciendo otras actividades donde no es posible realizar la recolección del excremento. Entonces, los porcentajes de tiempo se pueden observar en la figura 17.

Figura 17

Distribución del tiempo por bovino al día.



Nota. El diagrama circular indica de color azul el tiempo que estará cada vaca en la zona de ordeño, de color naranja el tiempo en el establo y en gris el tiempo que estará en otros o en zonas donde se difícil recolectar los excrementos. Tomado de: O. F. Camacho

Molano, "Plan de Negocio. Hato de Producción Lechera," *J. Pers. Soc. Psychol.*, vol. 1, no. 1, p. 144, 2017.

A partir de esta información se calcula con las siguientes ecuaciones la materia seca de la zona de ordeño y establo, que serán las fuentes de disponibilidad total de la materia excretada:

Ecuación 6

$$J_{ST,EXC,DISPONIBLE} = J_{ST,EXC} * \%R \left[\frac{kgST}{día} \right] \quad (6)$$

$J_{ST,EXC,DISPONIBLE}$

= Flux de sólidos totales excretados disponibles para el biodigestor por día

Siendo %R la suma del porcentaje del tiempo en la zona de ordeño y el tiempo en el establo. Es decir: 33,33%

$$J_{ST,EXC,DISPONIBLE} = 1.808,35 * (16,67\% + 16,67\%) = 602,78 \left[\frac{kgST}{día} \right]$$

La carga disponible de materia seca excretada por día disponible total es de 602,78 kgST/N*día.

Sin embargo, toda esta información se puede ver consignada en la tabla 11.

Tabla 11

Variables y parámetros para el cálculo del flujo de sólidos totales excretados.

Abreviaturas	Descripción	Valor	Unidades
% DIG	Porcentaje de digestibilidad	65	%
Jst, EXC, N	Flujo de sólidos totales excretados por bovino por día	6,46	KgST/N.día
N	Número de vacas	280	Vacas
Jst, EXC	Flujo de sólidos totales excretados por día	1808,345	KgST/día
%R	Porcentaje recolectable de excretas	33,3	%
Jst, EXC, DISPONIBLE	Flujo de sólidos totales excretados recolectables por día	602,78	KgST/día

Nota. El flujo de sólidos totales excretados recolectables por día es el que se utilizará posteriormente en el proyecto ya que es la cantidad de excremento que se puede recoger para ser utilizado en el biodigestor.

2.3.1. Comparación bibliográfica

El flujo total de excrementos debe tener en cuenta no sólo los sólidos totales sino también la cantidad de agua que acompaña este residuo biológico.

Hay diferentes literaturas que expresan el porcentaje de agua que hay en el excremento. Según Raúl Botero y Thomas Preston, “las excretas sólidas (estiércol) contienen, en promedio, 15% de materia seca” [31]. Considerando esta información se puede determinar el peso de las excretas totales por bovino al día. Si el flujo de sólidos totales excretados por bovino al día es de 6,46 kgST/N.día y esto representa el 15% del excremento total. Entonces, el 100% sería de 43,05 kg/N.día.[31].

Esta información se puede comparar en el artículo titulado: “Evaluación del potencial de generación de estiércol como materia prima para la producción de biogás en la Zona

Altamira, Tamaulipas” donde afirman que la cantidad de estiércol excretado por vaca es el 8% de su peso total. Considerando que tenemos en cuenta que las vacas del hato lechero tienen un peso promedio de 550 kg. el 8% indicaría que la cantidad de excremento sería de 44 kg/N.día. Este es un valor muy similar al calculado por el artículo mencionado con anterioridad. [32]

Por otro lado, el artículo de la Universidad Carlos III de Madrid, en el que se realizó el diseño, construcción y puesta a punto de un biodigestor tubular.[33] Se incluye en la teoría que el contenido seco del estiércol de vaca es del 17% y el contenido hídrico del 83%. Esto se refleja en un total de excreciones de 37,99 kg/N.día. Sin embargo, en el mismo, se estimó de forma experimental la cantidad de materia seca y agua en 4 muestras diferentes. Los resultados se pueden ver a continuación:

Tabla 12

Valores experimentales del porcentaje de masa seca y húmeda.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Promedio
% Masa seca	30,53%	49%	27,33%	38,44%	36,33%
% Masa húmeda	69,47%	51,00%	72,67%	61,56%	63,68%

Nota. Resultado del proyecto referenciado respecto al porcentaje de masa seca y húmeda en 4 muestras de excretas diferentes. Tomado de: S. Gómez Muñoz, “Diseño, construcción y puesta a punto de un biodigestor tubular,” 2012.

Finalmente, se observó la información de un hato lechero que se encuentra en Ecuador y cuyas características climáticas y de la raza de ganado son similares a las del presente proyecto [34]. Experimentalmente, se estimó que el porcentaje de sólidos totales es de 19,9% en peso.

Considerando la información brindada por las referencias, se tendrá en cuenta la información dada por el artículo de Ecuador [34]. Es decir, que se considerará que el porcentaje de sólidos totales es de aproximadamente 20%.

2.3.2. Flujo másico de sustrato

El valor del flujo másico de sustrato se obtiene utilizando la información del literal 2.3. con una cantidad de sólidos totales recolectables de 602,78 kg al día. Y la información sobre porcentajes de sólidos totales respecto al total de estiércol fresco se obtiene del numeral 2.3.1.

Ecuación 7

$$602,78 \left[\frac{kg ST}{día} \right] * \frac{100\%}{20\%} = 3013,91 \left[\frac{kg EF}{día} \right] \quad (7)$$

Siendo el sustrato la mezcla de estiércol fresco y agua en proporción 1:1. Por lo tanto el flujo másico de sustrato es:

Ecuación 8

$$M_s = 3013,91 \left[\frac{kg EF}{día} \right] * 2 = 6027,82 \left[\frac{kg}{día} \right] \quad (8)$$

2.3.3. Estimación de la cantidad de agua adicional

Es pertinente mencionar que la recolección de estiércol va vinculada a una adición de agua diferente a la que viene del excremento como tal. Esto se debe a que al recogerlo se utilizan comúnmente dos métodos de limpieza: La remoción de sólidos con pala y el lavado posterior con manguera.

Como se mencionó en el marco teórico, la cantidad de agua versus excremento es un parámetro que es determinante para la producción de biogás. De tal modo se debe estimar la cantidad de agua durante estos procesos.

Sin embargo, para materia de este trabajo, se tendrán en cuenta los resultados ofrecidos en el Webinar: Biodigestores en granjas lecheras: estimación de generación de excretas y efluentes [23]. Pues en este se determinó que, para una recolección de sólidos excretados por barrido en seco o palas y posterior limpieza por medio de una manguera, se utilizaron 21,1 litros de agua por vaca al día en uno de los hatos. Y en otro se utilizaron

20,3 litros de agua por vaca al día. Por ello, se tendrá en cuenta el promedio de estos dos valores.

Ecuación 9

$$Q_{Agua,N} = \frac{21,1 + 20,3}{2} = 20,7 \left[\frac{\text{Litros de agua}}{N.\text{día}} \right] \quad (9)$$

Por lo tanto, si la cantidad de excremento al día es de 43,0558 kg/N.día, se tiene en cuenta este 20,7 Litros de agua/N.día para cumplir con la proporción excremento:agua que se establecerá posteriormente.

A pesar de la cantidad de agua que adquirió el estiércol, dentro de la información brindada por el Webinar, mencionan que la densidad y la textura permite que se pueda hacer la recolección con palas.

2.4. Alimentación

Debido a que la caracterización del excremento obtenido por el ganado depende directamente de la alimentación, es necesario clarificar la alimentación ajustada al presente proyecto, así como para los proyectos cuyos hatos lecheros tengan condiciones similares a la laguna de Fúquene.

La tabla 13 muestra los valores nutricionales necesarios para una vaca entre 500 y 600 kg y con la que se busca producir 50 litros de leche al día.

Tabla 13*Requerimientos nutricionales.*

Descripción	Unidad	Valor
Energía neta lact.	Mcal/kg	1,72
NDT (nutrientes digestibles totales)	% de masa seca	75
Proteína cruda	%	18
Fibra cruda	%	15
Fibra detergente ácida	%	19
Fibra detergente neutra	%	25
Calcio	%	0,66
Fósforo	%	0,41
Magnesio	%	0,25
Potasio	%	1
Vitamina A	UI	3200

Nota. Estos valores corresponden únicamente a vacas lecheras que cumplan con el peso y la producción de leche previamente estipulada. Tomado de: O. F. Camacho Molano, "Plan de Negocio. Hato de Producción Lechera," J. Pers. Soc. Psychol., vol. 1, no. 1, p. 144, 2017.

La información presentada con anterioridad se verá distribuida en el horario de los bovinos de la manera presentada en la tabla 14.

Tabla 14*Horario sobre alimentación del ganado del hato lechero.*

Hora aproximada	Actividad
6:00 a. m.	Ordeño
8:00 a. m.	Pastoreo
12:00 p. m.	Complemento dietario
1:00 p. m.	Pastoreo
5:00 p. m.	Ordeño
7:00 p. m.	Corral

Nota. La hora es aproximada debido a que las vacas entran por turno a la sala de ordeño. Tomado de: O. F. Camacho Molano, "Plan de Negocio. Hato de Producción Lechera," J. Pers. Soc. Psychol., vol. 1, no. 1, p. 144, 2017.

3. BIODIGESTOR

3.1. Elección del tipo de biodigestor

Para escoger el diseño adecuado para el biodigestor a considerar, es necesario remitirse al marco teórico del presente proyecto. En este se tuvieron en cuenta 4 tipos de biodigestores en los que se tendrán en cuenta diferentes parámetros para la elección del que mejor se adecua a las condiciones del hato lechero.

A cada parámetro se le otorgará un valor sobre cuánto debe afectar en la calificación final y a cada tipo de biodigestor se le asignará su respectiva calificación según el parámetro.

Tabla 15

Tabla de decisión sobre el tipo de biodigestor

Parámetro	Tipo de biodigestor				
	Valor porcentual	De domo fijo	De domo flotante	De estructura flexible	De alta velocidad
Facilidad de operación	20%	50	60	90	20
Costos de instalación	23%	30	50	90	20
Costos de mantenimiento	17%	70	50	50	60
Eficiencia	16%	60	60	20	90
Espacio por utilizar	6%	70	70	30	60
Durabilidad	8%	90	70	60	70
Estabilidad	10%	20	20	80	95
Total	100%	51.8	53.4	65	51.9

Nota: Cada calificación fue multiplicada por su respectivo valor porcentual. También hay que tener en cuenta que el puntaje va de 0 a 100 siendo 100 la máxima nota.

Como se observa en la tabla 15. para poder evaluar la facilidad de operación se tuvo en cuenta factores como, qué tanta preparación debe tener quienes operen el biodigestor y los costos que cada biodigestor presenta. Esta preparación debe incluir los criterios técnicos para operarlo, así como todo lo que se refiere al contenido de seguridad, manejo y mantenimiento predictivo. Debido a que los biodigestores de domo fijo y domo flotante tienen estructuras sensibles a la presión [35], cuya desinformación puede causar grietas en la estructura, se le asigna un valor de 60 en este aspecto.

El biodigestor de estructura flexible es un poco más amigable y sencillo de utilizar [36], sobre todo porque se puede hacer con materiales de fácil acceso, esta es la razón por la que se le asignó un valor de 90 pues aún hay información que debe conocer los operarios para su funcionamiento.

Finalmente, el biodigestor de alta velocidad es el que posee la tecnología más avanzada de los 3, y así como es avanzado requiere de mayor conocimiento para su manejo y mantenimiento, por ello tiene un valor de 20. Para poder evaluar la facilidad de operación se tuvo en cuenta factores como, qué tanta preparación debe tener quienes operen el biodigestor.

Otro parámetro para evaluar, son los costos de instalación. Estos se refieren a los materiales, mano de obra y energía necesaria para la fase inicial de proyecto que permite arrancar el biodigestor como tal. Respecto a los biodigestores a evaluar, se considera el de estructura flexible como el más económico puesto que los materiales estructurales suelen ser PVC y otros polímeros de bajo costo. [36]

De igual forma, el biodigestor de domo flotante posee una estructura fija que involucra materiales como concreto, acero, entre otros [37], que aumenta su costo inicial. Pero, al tener una presión interna controlable debido al domo movable estos materiales son de menor costo comparado con el de domo fijo. Y, con una calificación menor, se encuentra el biodigestor de alta velocidad cuya inversión inicial es significativamente mayor a las mencionadas con anterioridad ya que posee una estructura con mayor complejidad, así como la utilización de equipos que aseguren un flujo rápido del sustrato a utilizar para la formación de biogás.

El costo de mantenimiento se evaluó considerando el posible reemplazo de materiales a corto plazo, así como posibles daños tempranos en las estructuras de los biodigestores.

Se considera que es el de estructura flexible el que mantenimiento tendrá puesto que los materiales que se utilizarán en su instalación tienden a ser menos duraderos, pero, también gracias a ello, los costos de mantenimiento serán bajos; así se le otorga un valor de 50 puesto que no es costoso, pero si frecuente.

El biodigestor de domo flotante posee materiales que requieren protección contra la corrosión, refrigerantes, entre otros, [37] y por esta razón es el que se le otorgó la misma calificación que al biodigestor de estructura flexible.[37] y por esta razón es el que se le otorgó la misma calificación que al biodigestor de estructura flexible. El de domo fijo y el de alta velocidad poseen las ventajas de que son de alta duración, pueden durar hasta 20 años [7].

Sin embargo, a pesar de que sus mantenimientos no son frecuentes si es necesario invertir en este aspecto, por lo que se le otorga una calificación ligeramente mayor al de domo fijo pues su mantenimiento no será tan costoso como el de alta velocidad.

La eficiencia se evalúa respecto a las posibilidades de obtener biogás de forma constante y el tiempo de residencia del sustrato dentro del biodigestor. En ese orden de ideas, el biodigestor de alta velocidad es el que mayor eficiencia tiene y, por ende, mejor calificación. Posteriormente, se ubican los biodigestores de domo fijo y domo flotante ya que de ellos se puede obtener una presión de biogás constante, sin embargo, los tiempos de retención son mayores comparado con los de el de alta velocidad. [7]

Finalmente, el de estructura flexible cuenta con menor calificación pues el flujo de biogás se ve afectado por diferentes factores y condiciones de operación que son fácilmente alterables al no tener un equipo moderno.

Respecto al espacio a utilizar, se considera que los biodigestores de domo fijo, domo flotante y alta velocidad utilizarán un área similar puesto que requiere de una mayor excavación y de menor área superficial, con una ligera diferencia en la de alta velocidad pues esta puede requerir mayor área debido a las zonas de mezclado que no consideran los otros biodigestores. El de estructura flexible es el de menor calificación pues, al no requerir de excavaciones profundas, se ve compensado el volumen con el área superficial ocupada.[7]

La durabilidad se calificó teniendo en cuenta la información teórica encontrada y expuesta en el marco teórico. Siendo el biodigestor de domo fijo el que mejor calificación

obtuvo pues tiene una vida útil de aproximadamente 20 años. Toda esta información teniendo en cuenta el mantenimiento requerido en cada estructura.

Finalmente, la estabilidad, ligada a la eficiencia y a la capacidad del biodigestor de controlar su presión y que su estructura no se vea afectada por esta. Por esta razón, los biodigestores de domo son los que tienen calificaciones más bajas pues, entre sus desventajas, se encuentra que la estructura de estos sistemas puede verse afectadas por altas presiones. Además, el biodigestor de alta velocidad controla muy bien este tipo de situaciones debido a todos sus instrumentos de control. [7]

3.2. Pretratamiento del sustrato

Considerando que el sustrato debe tener ciertas características para asegurar una alta eficiencia en la producción de biogás, así como la optimización de los tiempos de retención; es necesario realizar un pretratamiento a las excretas calculadas con anterioridad.

Inicialmente, se recomienda hacer un análisis fisicoquímico de las excretas de las que se dispone. Esto depende de factores como la alimentación, el tipo de animal del que se hará uso las excretas, por lo que será necesario hacer algunos cambios en estos factores o en el mismo sustrato, si las concentraciones de los inhibidores se encuentran por encima del valor presentado en la tabla 16.

Tabla 16

Concentración inhibidora de inhibidores comunes identificados.

Inhibidor	Concentración inhibidora
SO ₄	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
Nitrato	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	100 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN	25 mg/l
Detergente	20-40 mg/l
Na	3500-5500 mg/l
K	2500-4500 mg/l
Ca	2500-4500 mg/l

Nota. Usualmente las excretas no superan estos valores a menos que se esté trabajando con vacas enfermas o en condiciones anormales. Tomado de: Y. Olaya and L. González, “Fundamentos para el diseño de Biodigestores-Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas,” J. Ekon. Malaysia, vol. 51, no. 2, p. 31, 2009.

Este análisis se puede realizar al iniciar con la operación y no es necesario hacerlo a menos que haya un cambio en la alimentación del ganado, como el forraje o concentrado, o un cambio sustancial en la genética de esta. Pero, se recomienda hacerla de forma periódica pues hay cambios que no pueden verse a simple vista por los operarios. Por lo tanto, se sugiere que sea cada uno o dos años pues si se realiza en periodos muy cortos podría llegar a representar más costos innecesarios en el diseño.[38] [39]

La evaluación fisicoquímica también debe tener en cuenta los parámetros siguientes:

3.2.1. pH.

Este valor es un parámetro que se debe tener en cuenta para un correcto funcionamiento del biodigestor, un rango entre 6.8-7.2, para garantizar este parámetro se debe realizar

la medición con pHmetro luego de haber mezclado el estiércol con el agua, ya que está en función de la concentración de los ácidos volátiles presentes. [40]

Sin embargo, dentro del biodigestor el pH puede variar de diferentes formas pues las reacciones de acidogénesis requieren un pH de 5,5 a 6,5. Pero, las bacterias encargadas de la metanogénesis requieren un pH entre 7,8 y 8,2. [36]

Estos valores de pH pueden verse corregidos [39], sobre todo porque el estiércol no es el sustrato total que ingresa al biodigestor, sino que debe mezclarse con agua de forma previa. Por lo que hay que tener en cuenta el pH cuando ya esté mezclado con agua.

3.2.2. Relación carbono/nitrógeno

Dentro de los macronutrientes que debe contener el biodigestor, como lo son el carbono y nitrógeno, se debe establecer una relación C/N entre 20 y 30. Esto se debe a que el carbono es utilizado como fuente de energía por parte de los microorganismos que hacen parte de la digestión anaerobia y el nitrógeno es necesaria para su crecimiento.[36]

3.2.3. Proporción estiércol: agua

La cantidad de humedad o agua debe situarse en aproximadamente el 90% del contenido total del sustrato. Si consideramos una cantidad de sólidos totales del 20%, para que el agua sea 90% la relación estiércol: agua debe ser 1:1 [34].

Esta proporción indica que por un kilogramo de estiércol fresco es necesario añadirle 1 kilogramo de agua. Cómo se vio en el capítulo 2, el estiércol puede haberse mezclado previamente con agua en las zonas de ordeño y la limpieza de los establos. Por lo tanto, en el agua a adicionar hay que tener en cuenta el agua que ya se mezcló con el estiércol producto de la limpieza de la sala de ordeño y establos.[23] [39]

3.2.4. Micronutrientes

Para un ideal crecimiento de las bacterias, se debe tener en cuenta el contenido de micronutrientes para el buen desarrollo de las rutas metabólicas, dentro del biodigestor debe haber una relación de nitrógeno y potasio en N/P=5, y metales como el sodio, potasio, calcio además magnesio; concentraciones pequeñas de hierro, cobre, cinc, níquel y azufre.

Después de comprobar que la concentración de inhibidores en el sustrato no supera los límites recomendados, es necesario mezclar muy bien los excrementos con el agua necesaria para cumplir la proporción. Para esto se puede usar desde un sistema industrial que requiere energía para poder funcionar o, en este tipo de casos más rurales, se puede hacer de forma manual.

El pretratamiento continúa con la filtración de ciertos sólidos que impiden la degradación completa del sustrato. Entre estos sólidos se encuentran: piedras, aserrín, ramas maduras o verdes, virutas, tierra, huesos, entre otros [41]. De igual forma, se recomienda no utilizar el estiércol de vacas a las que se les haya aplicado medicamentos antivirales o antibióticos, pues esto puede afectar seriamente la fermentación.[42]

3.3. Selección composiciones iniciales

Las características del estiércol bovino de la vereda Nemoga de Fúquene de manera teórica, se tuvo en cuenta varias investigaciones que tienen parámetros similares con respecto a la temperatura de la zona, altitud de la zona y tipo de ganado. A continuación, se muestran las características del estiércol bovino y las características geográficas de cada investigación.

Tabla 17

Características del proyecto de la Finca del Oriente Ecuatoriano.

Características	Valor
Lugar	Orellana, Ecuador
Condición climática	20 - 35 °C
Altitud	255 m.s.n.m.
Tipo de ganado	Lechero

Nota. Esta tabla muestra parámetros que se deben tener para determinar características similares del estiércol bovino. Tomado de: F. Brito, Hanníbal; Echeverría, Magdy; Yaulema, “Generación De Biogás a Partir De Estiércol De Ganado a Nivel De Finca En

El Oriente Ecuatoriano,” *Xxxv Congr. Interam. Ing. Sanit. Y Ambient.*, no. August, pp. 15–20, 2016, doi: 10.13140/RG.2.2.25157.04327.

Como se observa en la tabla 17, el tipo de ganado con el cual se realizó los análisis fisicoquímicos son para producción de leche. Al tener este parámetro similar, son datos que van a tener gran semejanza, pues al ganado lechero se alimentan por lo general con la misma relación de nutrientes para garantizar una buena producción de leche. La condición climática es más alta en comparación a la vereda Nemoga y la altitud mucho más baja, estas características son aspectos que pueden llegar hacer que las excretas de los bovinos presenten variabilidad en sus propiedades.

Tabla 18

Propiedades físico y químicas del ganado en Orellana.

Características del estiércol	Unidades	Valor
Sólidos totales	%	48,76
Materia orgánica	%	26,53
Carbono Orgánico total	%	15,84
Nitrógeno total	%	1,32
Fosforo	%	0,12
Potasio	%	15,22
Manganeso	%	0,28
Zinc	%	0,10
Cobre	%	0,022
Hierro	%	1,34
Humedad	%	51,24
Coliformes totales	Col/g	1,94x10 ⁶
Coliformes fecales	Col/g	1,23x10 ⁶
Relación C/N	-	24
Densidad	Kg/m3	986,49
pH	-	7,8

Nota. Estas propiedades físicas y químicas son de ganado lechero ubicado en una zona de baja altitud y temperaturas cálidas. Tomado de: F. Brito, Hanníbal; Echeverría, Magdy; Yaulema, "Generación De Biogas a Partir De Estiércol De Ganado a Nivel De Finca En

El Oriente Ecuatoriano,” *Xxxv Congr. Interam. Ing. Sanit. Y Ambient.*, no. August, pp. 15–20, 2016, doi: 10.13140/RG.2.2.25157.04327.

Este proyecto se realizó para la generación de biogás, los parámetros que se muestran en la tabla 18 se midieron en un laboratorio por diferentes métodos y técnicas. De los resultados se puede mencionar que el pH está dentro de un rango que puede funcionar en un biodigestor, la cantidad de humedad es relativamente alta, en el caso de la relación C/N está dentro del rango óptimo para el uso dentro de un biodigestor, entre otros parámetros, este proyecto de investigación tiene resultados ideales que evitarían agregar otros componentes.

Tabla 19

Características del proyecto de la productora lechera en Jalisco.

Características	Valor
Lugar	Jalisco, México
Condición climática	18-23
Altitud	1355 m.s.n.m.
Tipo de ganado	Lechero

Nota. Esta tabla muestra los parámetros utilizados y comparados para la búsqueda de las características del estiércol bovino. Tomado de: R. Cordero, “Caracterización Química Del Estiércol Y Su Manejo En Explotaciones De Lechería Familiar De Los Altos De Jalisco,” p. 89, 2013.

En la tabla 19, se observa que los parámetros establecidos son más cercanos a la vereda Nemoga con respecto a la condición climática, a pesar de que aún este proyecto en Jalisco presenta baja altitud en comparación con la vereda Nemoga, los datos pueden llegar a ser más aproximados.

Tabla 20

Propiedades físico y químicas del ganado en Jalisco.

Características del estiércol	Unidades	Valor
Materia orgánica	%	70
Nitrógeno total	%	1,5
Fosforo	%	0,6
Potasio	%	2,5
Manganeso	%	0,26
Zinc	Ppm	130,6
Humedad	%	36
Densidad	Kg/m3	1040
Calcio	%	3,2
Magnesio	%	0,8
Sodio	%	1,6
Hierro	%	0,354
Relación C/N	-	26
pH	-	8

Nota. Esta tabla muestra los parámetros utilizados y comparados para la búsqueda de las características del estiércol bovino. Tomado de: R. Cordero, "Caracterización Química Del Estiércol Y Su Manejo En Explotaciones De Lechería Familiar De Los Altos De Jalisco," p. 89, 2013.

Para el caso de este proyecto, se observa que presenta un aumento del pH y una relación C/N también más alta en la tabla 20, una humedad más baja y mayor cantidad de

nitrógeno en el estiércol. Estas características que se mencionaron anteriormente en comparación con el proyecto número 1, pueden justificarse estos cambios por la zona de ubicación y la variabilidad de los climas. Estos datos pueden llegar a ser más aproximados a la vereda de Nemoga.

Dentro de los proyectos que se recolectaron para visualizar los cambios de las características del estiércol bovino, el que presenta mayor cercanía con respecto a las condiciones climáticas de la zona y la altitud con respecto a la vereda Nemoga, es un proyecto que se realizó en la Finca Riobamba, su cercanía se puede observar en los datos expuestos en la tabla 21. Este proyecto realiza el diseño de un biodigestor, y en este caso, los mismos investigadores realizaron los análisis para las características fisicoquímicas, y tuvieron en cuenta muchos más datos para el correcto funcionamiento del biodigestor, como es la carga de mesófilos, descripción de los sólidos volátiles, sulfatos entre otras más, como se puede observar en la tabla 22.

Tabla 21

Características del proyecto de una finca en Riobamba.

Características	Valor
Lugar	Riobamba, Ecuador
Condición climática	8 - 16 °C
Altitud	2347 m.s.n.m.
Tipo de ganado	Lechero

Nota. Esta tabla muestra los parámetros utilizados y comparados para la búsqueda de las características del estiércol bovino. Tomado de: E. Lara and M. Hidalgo, “Diseño de un Biodigestor y conducción del biogás Generado por las Excretas de Ganado Vacuno, Estación Tunshi-Epoch,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2011.

Tabla 22

Propiedades físico y químicas del ganado en Riobamba.

Características del estiércol	Unidades	Valor
Sólidos totales	%	19,9
Materia orgánica	%	16,4
Nitrógeno total	%	1,3
Fosforo	%	1
Potasio	%	2,1
Humedad	%	72,23
Sólidos volátiles	%	12,6
pH	-	9
Sulfuros	mg/L	160
DQO	%	58
DBO	g/kg	55
Aerobios Mesófilos	UFC/ml	$6,2 \times 10^6$
Relación C/N	-	25:1
Cenizas	%	2,24
Alcalinidad	mg/L	400
Coliformes totales	%	$3,3 \times 10^4$

Nota. Esta tabla muestra los parámetros utilizados y comparados para la búsqueda de las características del estiércol bovino. Tomado de: E. Lara and M. Hidalgo, "Diseño de

un Biodigestor y conducción del biogás Generado por las Excretas de Ganado Vacuno, Estación Tunshi-Espoch,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2011.

Esta última localización es la que muestra mayor similitud con las condiciones climáticas, similitud de razas, temperatura, entre otros. Comparado con la información del ható lechero del presente proyecto. Por lo que se utilizará la información de esta referencia para soportar el balance de materia del biodigestor del presente proyecto.

Además, se considera la caracterización de bioles en un estudio presentado por el Instituto Tecnológico del Altiplano, México, para soportar la información de la referencia de Riobamba, Ecuador. Cuyas características se pueden ver en la tabla 23.

Tabla 23

Características del proyecto de una finca en Tlaxcala.

Características	Valor
Lugar	Tlaxcala, México
Condición climática	15,1 °C
Altitud	2425 m.s.n.m.
Tipo de ganado	Lechero

Nota. Esta tabla muestra los parámetros utilizados y comparados para la búsqueda de las características del estiércol bovino. Tomado de: M. Cano-Hernández, A. Bennet-Eaton, E. Silva-Guerrero, S. Robles-González, U. Sainos-Aguirre, and H. Castorena-García, “Caracterización de bioles de la fermentación Anaeróbica de excretas bovinas y porcinas,” *Agrociencia*, vol. 50, no. 4, pp. 471–479, 2016.

3.4. Especificaciones técnicas del diseño estándar de un biodigestor tubular

3.4.1. Dimensiones del biodigestor tubular

3.4.1.a. Estimación de la carga diaria. Inicialmente, es necesario considerar el estiércol fresco en términos de volumen. También hay que considerar la proporción excremento: agua que, como se mencionó en el literal 3.2.3., será 1:1.

Según [41], de forma experimental se determinó que la densidad del estiércol es de 986,49 kg/m³. Por ende, es posible hallar la densidad de la mezcla agua estiércol de la siguiente manera:

Ecuación 10

$$\rho_{mezcla} = \rho_{estiércol} * EF\% * \rho_{agua} * H2O\% \quad (10)$$

Considerando que EF% es el porcentaje de estiércol fresco que hay en la mezcla y H2O% es el porcentaje de agua que hay en la mezcla. Como la cantidad de estiércol fresco y agua es la misma, entonces EF% y H2O% son igual a 50%. También, se considera la densidad del agua como 1000 kg/m³. Por lo tanto, la densidad de la mezcla sería:

$$\rho_{mezcla} = 986,49 \frac{kg}{m^3} * 50\% + 1000 \frac{kg}{m^3} * 50\% = 993,25 \frac{kg}{m^3}$$

De esta forma, es posible calcular el volumen del sustrato, es decir, de la fase líquida que entrará al biodigestor.

Ecuación 11

$$V_s = \frac{M_s}{\rho_{mezcla}} * t_r \quad (11)$$

Siendo V_s el volumen de la fase líquida o sustrato, que se determinará usando el valor de M_s, el peso de la fase líquida calculada con anterioridad y cuyo valor es 6027,82 kg/día.

$$V_L = \frac{6027,82 \text{ kg/día}}{993,25 \text{ kg/m}^3} * 35 \text{ días} = 212,41 \text{ m}^3$$

Según [39] para determinar las dimensiones, es importante aclarar que los biodigestores tubulares poseen dos zonas distintas, una zona gaseosa en donde está el biogás y la zona líquida donde ocurren las reacciones de digestión en el sustrato, allí se va a administrar la carga diaria de estiércol con agua. La bibliografía [39] establece que el

volumen ocupado en el biodigestor es 80% líquido (sustrato) y del gas del 20% a la hora de establecer el diseño del biodigestor. Sin embargo, hay más literatura que afirma que el volumen del líquido debe ser del 75% y el volumen del gas debe ser del 25% [33]. Además, este criterio de diseño no depende de factores como el clima, la cantidad de sustrato, ni siquiera del tiempo de retención. Pues, la cantidad de gas que haya depende de cuánto se quiera almacenar en el propio biodigestor.[39]

Por lo tanto, y teniendo en cuenta un tiempo de retención de 35 días, el volumen total del biodigestor se determina de la siguiente manera:

Ecuación 12

$$V_T = \frac{100\% * V_S}{80\%} = 265,51m^3 \quad (12)$$

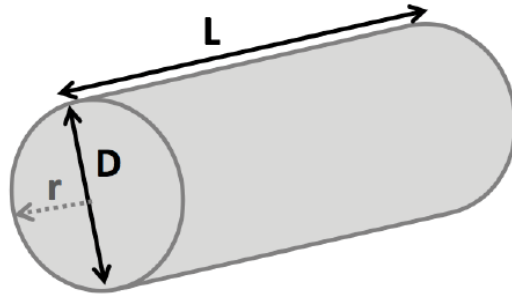
El tiempo de retención se estableció teniendo en cuenta la temperatura de funcionamiento de biodigestor. La bibliografía indica que para la temperatura de funcionamiento es necesario que el tiempo de retención se encuentre entre 30 y 35 días [43]. Además, teniendo en cuenta el hato lechero de Riobamba, cuyos datos aportarán información de producción de biogás para el presente proyecto, ellos consideraron un tiempo de retención de 35 días. [34]

3.4.1.b. Cálculo de diámetro y longitud. Posteriormente, en el análisis del artículo [39] se encuentra una heurística que establece que la relación L/D, es decir, longitud entre diámetro del biodigestor, que se puede observar en la figura 18, debe encontrarse entre 5 y 10. Esto ya que el diámetro no puede ser mayor que la longitud del biodigestor en búsqueda de que no haya zonas muertas dentro de él.

Se espera que el material de la geomembrana sea de polietileno, ya que este material es resistente a los ácidos orgánicos y otros componentes corrosivos que se forman dentro del biodigestor. La forma debe ser tubular o cilíndrica, pues este diseño garantiza que la entrada y la salida queden separadas por la longitud del biodigestor, además es uno de los biodigestores más versátiles y de bajo costos en Latinoamérica.

Figura 18

Esquema de un cilindro.



Nota. Representación del volumen de un biodigestor tubular a partir del diámetro y la longitud. Tomado de: J. Martí Herrero, *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*. 2019.

Con esto en mente se puede establecer la siguiente ecuación:

Ecuación 13

$$V_T = \pi * r^2 * L \quad (13)$$

Considerando que V_T se calculó en el literal anterior y r es el radio del biodigestor como se observa en la figura [16] y L la longitud también expresada en la figura [16]. Sin embargo, como se mencionó, la heurística relaciona la longitud y el diámetro por lo que teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

Ecuación 14

$$r = \frac{D}{2} \quad (14)$$

Podemos ver la ecuación [13] de la siguiente manera:

Ecuación 15

$$V_T = \pi * \frac{D^2}{2} * L \quad (15)$$

En ese mismo orden de ideas y estableciendo la relación $L/D=7,5$ y teniendo en cuenta que el valor total del volumen es de $265,51 \text{ m}^3$ se obtiene un valor de $L= 26,69 \text{ m}$ y un $D= 3,56 \text{ m}$.

El valor de esta relación se estableció como $7,5$ ya que busca minimizar el área superficial que ocupa el biodigestor. Por lo tanto, por medio de una optimización de este valor, se espera que la menor área superficial sea cuando la relación L/D sea de $7,5 \text{ m}$.

No obstante, se busca que el biodigestor ocupe la menor área posible y esta área está dada por la ecuación:

Ecuación 16

$$A_{\text{biodigestor}} = L * D \quad (16)$$

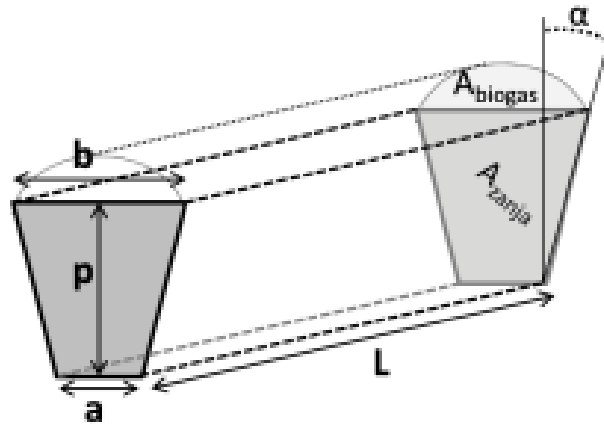
Para optimizar este espacio es necesario que la relación $L/D=5$, de esta forma el valor del diámetro sería de $D=4,07 \text{ m}$, el valor de la longitud sería de $L=20,37 \text{ m}$ y el área que ocuparía el biodigestor sería $A=82,98 \text{ m}^2$.

3.4.2. Dimensiones de la zanja de los biodigestores tubulares

Los biodigestores tubulares no pueden estar en la intemperie, por lo general vienen resguardados principalmente por una zona a la cual se le denomina zanja, que contiene la fase líquida del biodigestor, es común encontrar el diseño de la zanja en forma de trapecoides, como se observa en la figura 19, para así asegurar que las paredes no se derrumben o dañen el biodigestor.[39]

Figura 19

Esquema de la zanja en forma trapezoidal.



Nota. (a) ancho inferior, (b) ancho superior, (p) profundidad y (L) Longitud. Tomado de: J. Martí Herrero, *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*. 2019. Para conocer las dimensiones del volumen de la zanja que contendrá la fase líquida, se debe conocer el área que forma el trapecio y posteriormente calcular el volumen.

Ecuación 17

$$A_{zanja} = p * \frac{(a + b)}{2} \quad (17)$$

A_{zanja} = Área del trapecio de la zanja (m^2)

p = Profundidad (m)

a = ancho inferior (m)

b = ancho superior (m)

Ecuación 18

$$V_{zanja} = V_L = A_{zanja} * L \quad (18)$$

$$L = \frac{V_L}{A_{zanja}}$$

Siendo,

V_L = Volumen de la zanja (m^3)

$$V_L = \text{Volumen líquido (m}^3\text{)}$$

$$L = \text{Longitud de la zanja (m)}$$

Es importante que el perímetro de la zanja sea menor que la circunferencia del cilindro que se calcula para el biodigestor, para así lograr la cúpula superficial. Para el cálculo del perímetro del área del trapecio se utiliza las siguientes ecuaciones para el cálculo de la apotema y para determinar el perímetro.

Ecuación 19

$$\text{Apotema} = \sqrt{\left(\frac{b-a}{2}\right)^2 + p^2} \quad (19)$$

Ecuación 20

$$\text{Perimetro}_{zanja} = a + 2 * \text{Apotema} + b \quad (20)$$

3.4.3. Diseño solar

Cómo se observa en el capítulo uno, sabemos que el hato lechero se encuentra en un lugar cuya temperatura promedio es de 13 °C. Esto se debe a que se encuentra a aproximadamente a 2700 msnm en el altiplano cundiboyacense.

Estas temperaturas no favorecen la fermentación anaerobia por lo que es necesario tener en cuenta un diseño solar que favorezca la incidencia de energía solar dentro del biodigestor y que impida la salida de energía en forma de calor del sistema. Para ello se debe tener en cuenta 3 cosas:

3.4.3.a. Color del material. El plástico del que estará hecho el biodigestor debe ser de color negro. Este color permite la mejor absorción de la radiación solar hacia el interior del biodigestor. La energía en forma de calor calentará por convección el biogás y este a su vez calentará la mezcla estiércol-agua. Esta característica es recomendable únicamente cuando el plástico que se utiliza como geomembrana es de polietileno. Pues, si es de PVC, la radiación solar directa provocará una expansión del biogás que será difícil de controlar y pueda resultar con la expansión del PVC.

3.4.3.b Construcción de aislante. Ubicar en paredes y en la zanja un aislante permite que

el calor del biodigestor no se pierda en los alrededores del sistema. Usualmente esto se hace de forma artesanal usando la técnica de tapia pisada o la técnica de bahareque y en la pared interior se puede añadir una capa de polietileno expandido como se ve en la siguiente figura 20.

Figura 20

Biodigestor con diseño solar implementado.



Nota. Las paredes pueden ser construidas con tapia pisada o bahareque para mayor economía. Tomado de: J. Martí Herrero, *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*. 2019.

Adicionalmente, se puede observar que la entrada del sustrato se encuentra por afuera de la estructura y también debería estar la salida del biól.

3.4.3.c. Invernadero. Es posible aprovechar la estructura del aislante añadiendo como techo un elemento de calefacción solar pasiva o invernadero. Este no solo sirve como protección a lluvias, sino que también permite la entrada de la radiación solar e impide su salida. Como se ve en la figura 18, lo mejor es que sea una estructura compacta para

así evitar pérdidas de calor.

3.4.3.d. Condiciones de temperatura. Las tres técnicas mencionadas con anterioridad, al ser utilizadas las tres al mismo tiempo, hacen que la temperatura de operación aumente entre 6 y 10°C más la temperatura promedio.

Cómo se mencionó en el capítulo 2, la temperatura promedio del Hato Lechero es de 13°C. Por lo que se asumirá que las estructuras hacen que la temperatura aumente hasta 20°C.

3.5. Balance de materia del biodigestor

Considerando la información brindada en el capítulo 3.3., donde se escogió por medio de la bibliografía, cuales propiedades fisicoquímicas se acoplaban más al modelo de nuestro biodigestor; es necesario determinar también en qué condiciones salen tanto el biogás como el bioabono. La siguiente información proviene de diferentes referencias, sin embargo, los porcentajes de compuestos de salida del bioabono provienen de la misma referencia con la que se determinó los porcentajes de componentes de entrada al biodigestor.[34]

3.5.1. Producción de biogás

Para determinar la cantidad de biogás que se produce se tuvo en cuenta la consideración del diseño solar. Por lo tanto, es necesario determinar cuál sería la producción cuando el sistema tenga esta temperatura. Para ello se obtuvo la siguiente información evidenciada en la tabla 24.

Tabla 24

Relación de producción de biogás, temperatura y sólidos totales.

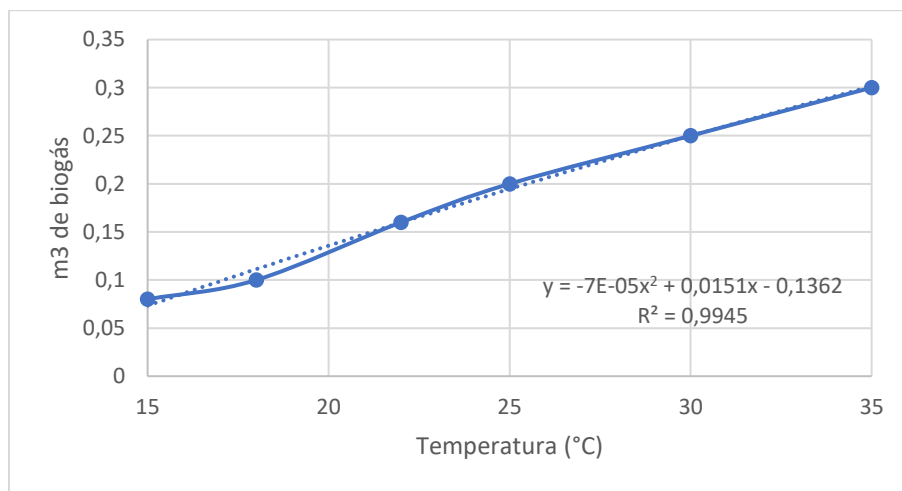
1 kg de estiércol Fresco (EF) = 0,20 kg de sólidos totales (ST)
1 kg de Sólidos totales (ST) = 0,8 kg de sólidos volátiles (SV)
1 kg de Sólidos totales (ST) = 0,3 m ³ de biogás @(35 °C y Pr Atm.)
1 kg de Sólidos totales (ST) = 0,25 m ³ de biogás @(30 °C y Pr Atm.)
1 kg de Sólidos totales (ST) = 0,3 m ³ de biogás @(25 °C y Pr Atm.)
1 kg de Sólidos totales (ST) = 0,16 m ³ de biogás @(22 °C y Pr Atm.)
1 kg de Sólidos totales (ST) = 0,10 m ³ de biogás @(18 °C y Pr Atm.)
1 kg de Sólidos totales (ST) = 0,08 m ³ de biogás @(15 °C y Pr Atm.)

Nota. Cantidad de biogás obtenido según contenido de sólidos totales. Tomado de: L. Douglas, “3rd Annual Biomass Energy Systems Conference Proceedings.”

Para obtener cuánto biogás se producirá por kilogramo de sólidos totales, se construyó la siguiente gráfica basada en la información que presentó en la tabla 24.

Figura 21

Temperatura (°C) versus biogás (m³) por kilogramos de sólidos totales a presión atmosférica.



Nota. Basada en la información de la tabla 21. La producción de biogás es proporcional a la temperatura.

De igual forma, se calculó la ecuación de la recta que relaciona las dos variables. Con un $R^2 = 0,9945$ se escogió la ecuación polinómica de segundo grado pues es la que más se ajustaba a los valores dados.

Ecuación 21

$$V_{biogás} \left[\frac{m^3}{kg ST} \right] = -7 * 10^{-5} * T[°C]^2 + 0.0151 * T[°C] - 0,1362 \quad (21)$$

Reemplazando el valor de T con 20°C obtenemos la siguiente tasa de biogás:

$$V_{biogás} \left[\frac{m^3}{kg ST} \right] = 0,1378 \left[\frac{m^3}{kg ST} \right]$$

Teniendo en cuenta la cantidad de sólidos totales estimada en el capítulo 2.3. se calcula la tasa de biogás que se puede obtener al día.

Ecuación 22

$$V_g = 602,78 \left[\frac{kg \text{ ST}}{\text{día}} \right] * 0,1378 \left[\frac{m^3}{kg \text{ ST}} \right] = 83,06 \left[\frac{m^3}{\text{día}} \right] \quad (22)$$

3.5.1.a. Revisión bibliográfica sobre tasa del biogás.

Tabla 25

Información sobre tasa de biogás según artículo con diferentes parámetros.

Referencia	Sólidos totales (%)	Tasa biogás (m ³ /kg SV)	Tasa biogás (m ³ /kg ST)	Tiempo de retención (días)	Contenido de metano (%)	Temperatura (°C)
R. Steffen, O. Szolar y R. Braun	5 a 12	0,2 a 0,3 (m ³ /kg SV)	0,1625	25	55 a 75	28-35
T. Bond y M. Templeton	16	0,2 a 0,3 (m ³ /kg ST)	0,25			
S. Maithel	10	0,3 (m ³ /kg SV)	0,195	30	58	35
H. Roubík y J. Mazancová	16	0,3 (m ³ /kg ST)	0,3			
L. Douglas	20	0,1378 (m ³ /kg ST)	0,1378	35	60	20

Nota. Considerando la temperatura más cercana al proyecto, la última referencia es la que se utilizó para estimar el biogás en el literal anterior.

Como se puede observar en la tabla 25, el valor obtenido de tasa de biogás por kilogramo de sólidos totales se encuentra por debajo de los arrojados por la literatura. Sin embargo, es preciso notar que, por ejemplo, en la primera referencia se tiene una temperatura en

un rango entre los 28 y los 35 °C la cual es una temperatura mayor que la que se utilizará en el sistema. Lo mismo ocurre con la tercera referencia, a pesar de que el tiempo de retención en estas es menor. Esto se debe a que, gracias a la temperatura del biodigestor, estas alcanzan el punto de mayor producción de biogás con más facilidad. Teniendo ya la cantidad de biogás producido, es necesario determinar el contenido de metano, dióxido de carbono, entre otros de este como se verá en el siguiente literal.

3.5.1.b. Composición del biogás. Para determinar estos parámetros se tuvieron en cuenta las siguientes referencias:

Tabla 26

Composición del biogás obtenido en la estación TUNSHI-ESPOCH.

Diseño de un biorreactor y conducción del biogás generado por las excretas de ganado vacuno, estación TUNSHI-ESPOCH	
CH ₄ (%)	50-70
CO ₂ (%)	30-40
H ₂ (%)	1-10
Nitrógeno, amoniaco, óxidos nítricos (%)	1-6
Sulfuro de hidrógeno y otros (%)	Trazas <1%

Nota. Tomado de E. Lara and M. Hidalgo, “Diseño de un Biodigestor y conducción del biogás Generado por las Excretas de Ganado Vacuno, Estación Tunshi-Espoch,” J. Chem. Inf. Model., vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2011.

Tabla 27

Composición del biogás obtenido en la construcción de una granja integral autosuficiente.

Implementación de un biodigestor a partir de residuos ganaderos, para uso doméstico en La Hacienda La Esperanza, Calceta, Bolívar, Manabí	
CH4 (%)	60-70
CO2 (%)	30-40
H2 (%)	1
H2S (%)	0,1-1
N2 (%)	0,5-3
CO (%)	0,1
O2 (%)	0,1

Nota. Tomado de S. F. Basurto Loor, Jhandry Manuel; Huiza Menéndez, “Implementación de un biodigestor a partir de residuos ganaderos, para uso doméstico en La Hacienda La Esperanza, Calceta, Bolívar, Manabí,” 2017.

Tabla 28

Composición del biogás obtenido en biodigestor operado en Cuba.

Manual para el diseño, montaje y operación de digestores plásticos de bajo costo. Una alternativa para Cuba.	
CH4 (%)	40-70
CO2 (%)	30-60
H2 (%)	0,1
N2 (%)	0,5
CO (%)	0,1
O2 (%)	0,1
H2S (%)	0,1

Nota. Tomado de D. Blanco Betancourt, “Manual para el diseño, montaje y operación de digestores plásticos de bajo costo. Una alternativa para Cuba,” Estac. Exp. Pastos Y Forrajes “Indio Hatuey,” 2012.

Considerando los parámetros de temperatura, tiempo de retención y relación agua: estiércol la que tiene valores más parecidos con el Hato Lechero de la Laguna de Fúquene es la primera referencia. Por eso se tendrá en cuenta la siguiente composición para el presente proyecto:

Tabla 29

Valores definidos del biogás que se utilizará en el presente proyecto.

Composición biogás	
CH ₄ (%)	50-70
CO ₂ (%)	30-40
H ₂ (%)	1
N ₂ (%)	1,75
CO (%)	0,1
O ₂ (%)	0,1
H ₂ S (%)	0,01

Nota. El porcentaje de dióxido de carbono se ajusta según sea el porcentaje de metano. Se considerará un rango del porcentaje de metano para tener en cuenta valores mínimos y máximos del gas a la hora de hacer el diseño de la cámara de combustión que se presentará en capítulos posteriores.

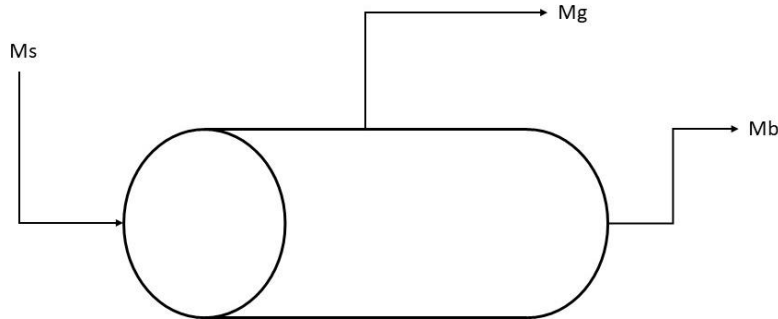
Sin embargo, para hacer los cálculos posteriores se utilizará el promedio de metano (60%) y el ajuste del porcentaje de dióxido de carbono para este valor de metano sería de 37,04%, según el balance de materia respectivo.

3.5.2. Balance de materia global

Teniendo la información sobre la cantidad y composición de biogás obtenido, es necesario hacer un balance de materia global para conocer la tasa de biol y biosol obtenido. Para esto se considera el sistema de la forma:

Figura 22

Biodigestor con sus respectivos flujos.



Nota. M_s es el flujo másico de sustrato (estiércol + agua) que entra al biodigestor. M_g es el flujo másico de biogás y M_b el flujo másico de biól y biosol que salen del biodigestor. El balance global se realizará teniendo en cuenta que ya se habrá superado la fase inicial del biodigestor cuando habrá más acumulación que salida.

Después de que el biodigestor se llene de sustrato y empiece a salir el biosol y biól, porque se irá llenando de sustrato por el otro lado, ahí empezará una etapa estable en el proceso.

Por lo tanto, el balance global se refleja en la siguiente ecuación:

Ecuación 23

$$V_g = M_s = M_g + M_b \quad (23)$$

En el capítulo 2.3.2. obtuvimos un flujo másico de sustrato de 6027,82 kg/día, equivalente a 6068,81 L/día. Pero, para poder realizar el balance de materia se debe realizar en unidades másicas.

Para poder estimar el flujo de salida del gas en unidades másicas es necesario determinar su densidad pues, la información del capítulo 3.5.1. esta dada en unidades de volumen. La densidad de los componentes fue determinada haciendo uso de tres referencias, la primera [44] para hallar la densidad del aire, dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, monóxido de carbono y oxígeno a 20°C.

La densidad del aire se utilizó para, haciendo uso de la segunda referencia [45] que expresaba la densidad relativa, hallar la densidad del metano. [44] para hallar la densidad del aire, dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, monóxido de carbono y oxígeno a 20°C. La densidad del aire se utilizó para, haciendo uso de la segunda referencia [45] que expresaba la densidad relativa, hallar la densidad del metano. Y, la tercera referencia [46] indica la densidad del ácido sulfhídrico a la temperatura de referencia. Los datos de las densidades se encuentran en la tabla 30.

Tabla 30

Densidad de los componentes del biogás y aire a 20°C.

Componente	ρ (kg/m ³)
Aire	1,21
CH ₄	0,73
CO ₂	1,85
H ₂	0,08
N ₂	1,18
CO	1,17
O ₂	1,34
H ₂ S	2,00

Nota. Para obtener estos datos fue necesario interpolar la información dada en la lectura bibliográfica pues no todos arrojaban un valor de la densidad a 20°C. Tomado de: Pubchem, "Pubchem." [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>. [Accessed: 10-Apr-2021].

Haciendo uso de las densidades y de los porcentajes de los compuestos del biogás, se hace un promedio ponderado para determinar la densidad del biogás. El resultado es de $\rho_g=0,95 \text{ kg/m}^3$

Ecuación 24

$$M_g = V_g * \rho_g = 83,06 \left[\frac{m^3}{día} \right] * 0,95 \left[\frac{kg}{m^3} \right] = 78,95 \left[\frac{kg}{día} \right] \quad (24)$$

Teniendo estos dos flujos másicos es posible hallar el flujo másico de bioabono, es decir, la mezcla de biol y biosol.

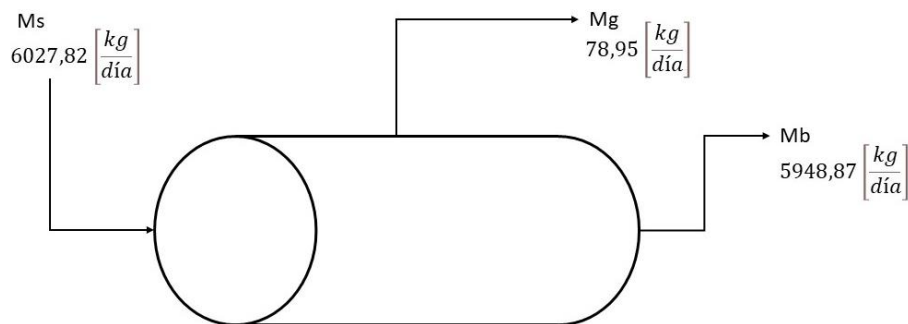
Ecuación 25

$$M_b = M_s - M_g = 6027,82 \left[\frac{kg}{día} \right] - 78,95 \left[\frac{kg}{día} \right] = 5948,87 \left[\frac{kg}{día} \right] \quad (25)$$

Los resultados se pueden ver reflejados en el diagrama global del biodigestor:

Figura 23

Biodigestor con sus respectivos flujos.



Nota. Entrada y salidas del biodigestor con sus respectivos valores de flujo másico.

3.5.3. Humedad

Como se mencionó con anterioridad, la humedad tendrá una proporción 1:1 respecto a la cantidad de estiércol fresco que ingresa al biodigestor. Teniendo en cuenta que ingresa una cantidad de 3055,18 L EF/día y que la humedad representa un 72% de este, se estima que la totalidad de agua que hay en el sustrato es de 5232,13 L agua/día. El agua será utilizada por los microorganismos para su propio metabolismo pues, esta molécula es necesaria para el rompimiento de enlaces de lípidos, carbohidratos y proteínas en el proceso de hidrólisis. De igual forma, participa en la acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis siendo un reactivo en todas estas etapas. Es por esto que se menciona la importancia de añadir más agua al estiércol en el pretratamiento.

Como ya se mencionó, en el sistema entra agua del estiércol al 72%, sin embargo, después del pretratamiento el porcentaje en peso de agua es del 86,12%.

Tabla 31

Valores de agua en la entrada y salidas del biodigestor.

Cantidad de agua			
Componente	Sustrato	Bioabono	Biogás
Agua (%)	86,12%	93,72%	Trazas
Agua (kg/día)	5190,85	5574,99	-

Nota. La cantidad de agua en el biogás es tan pequeña que se considera una traza. Como se puede observar la cantidad de agua es mayor en el bioabono que en el sustrato. Esto se debe a la actividad microbiana pues como producto de las reacciones de digestión anaerobia se tiene agua, así como para otros procesos metabólicos relacionados con el crecimiento de los microorganismos [47].

El dato porcentual de agua en el bioabono se puede soportar con el artículo de la caracterización de bioabono producido en un biodigestor de Tlaxcala, México. El promedio de humedad en esta referencia es de $95,18 \pm 1,90\%$ por lo que el porcentaje mencionado en la tabla 29 para el bioabono entra dentro este valor. [48]

Respecto a la cantidad de agua en el biogás, se puede entender que sean trazas, pues la afinidad del agua y del metano es muy baja. Esto se pudo observar en un estudio hecho en el Golfo de California [49], donde se tiene agua en condiciones de alto contacto con metano debido a su emisión causada por la alta cantidad de biomasa fitoplanctónica. Incluso, se habla de una sobresaturación de metano y hay presencia de metano en agua del orden de partes por billón.

3.5.4. Sólidos totales

Inicialmente, se cuenta con un porcentaje del 20% en peso de sólidos totales en las excretas, por lo que disminuye al 10% cuando se hace la mezcla del sustrato 1:1 con agua.

Tabla 32

Valores de sólidos totales en entrada y salidas del biodigestor.

Cantidad de sólidos totales		
Componente	Sustrato	Bioabono
ST (%)	10,00%	4,10%
ST (kg/día)	602,78	243,90

Nota. No se tuvo en cuenta el biogás pues en este no hay presencia de sólidos totales.

A pesar de la notoria disminución en los sólidos totales, hay una gran cantidad que no fueron utilizados en la digestión anaerobia. Esto indica que el sustrato aún podía producir más metano. Sin embargo, esto se analizará a fondo en el capítulo sobre sólidos suspendidos y sólidos volátiles.[34]

El valor de los sólidos totales del bioabono se compara con el de México cuyo resultado fue de $4,81 \pm 1.89\%$. Considerando la incertidumbre, los sólidos totales del bioabono del presente proyecto entran dentro de los valores del biól medido en México.[48]

3.5.5. Sólidos suspendidos

Estos sólidos hacen parte de los sólidos totales. Se considera como material orgánico que no se ha podido digerir del todo por los microorganismos encargados de la digestión anaerobia. Posiblemente, esto se deba a fallas en las condiciones de temperatura, presencia de compuestos u organismos inhibidores, tiempo de retención no óptimo, entre otros [34]. Los resultados de este parámetro fueron:

Tabla 33

Valores de sólidos suspendidos en entrada y salida del biodigestor.

Cantidad de sólidos suspendidos		
Componente	Sustrato	Bioabono
SS (%)	8,20%	3,95%
SS (kg/día)	494,28	234,98

Nota. No se tuvo en cuenta el biogás pues en este no hay presencia de sólidos suspendidos.

Como se puede observar la disminución de sólidos suspendidos fue de aproximadamente la mitad. Por lo que se puede considerar que aún se podía tener más tiempo el sustrato dentro del biodigestor.

3.5.6. Sólidos volátiles

Se espera que estos sean los sólidos que por medio de la digestión anaerobia se conviertan en los gases que componen el biogás. Sin embargo, se tiene en cuenta los sólidos suspendidos pues hay una parte de ellos que pueden convertirse en biogás. A pesar de esto hay diferentes referencias que utilizan la cantidad de sólidos volátiles (y no los totales como hicimos en el presente proyecto) para determinar la cantidad de biogás que se obtendrá en el biodigestor. [50] [51].

Tabla 34

Valores de sólidos volátiles en entrada y salida del biodigestor.

Cantidad de sólidos volátiles		
Componente	Sustrato	Bioabono
SV (%)	6,30%	2,85%
SV (kg/día)	379,75	169,54

Nota. No se tuvo en cuenta el biogás pues en este no hay presencia de sólidos volátiles.

Se observa que la tasa de disminución fue alta acorde al flujo de biogás de salida. Sin embargo, aún había una gran presencia de sólidos volátiles en el bioabono que debería ser aprovechada.

3.5.7. Nitrógeno

El nitrógeno en el estiércol se encuentra usualmente en forma de amonio. Este es aprovechado por las plantas que utilizan el bioabono. De igual forma, el proceso de digestión es la mejor forma de retener el nitrógeno en el abono pues, cuando el estiércol se seca al aire libre, puede perder hasta un 50% de su nitrógeno. Además, el proceso de digestión anaerobia produce más nitrógeno debido a la actividad microbológica que ocurre dentro del biodigestor [52]. Esto se debe a que el nitrógeno en el sustrato hacia parte de proteínas y aminoácidos y se contaba como sólidos totales, pero post-fermentación se convierte en amonio contando como nitrógeno.

Tabla 35

Valores de nitrógeno en entrada y salidas del biodigestor.

Cantidad de nitrógeno			
Componente	Sustrato	Bioabono	Biogás
Nitrógeno (%)	0,65%	0,85%	1,75%
Nitrógeno (kg/día)	39,18	50,57	1,72

Nota. El flujo másico de salida no es igual al de entrada debido a la cantidad de nitrógeno que se genera.

Se esperaba entonces que la cantidad de nitrógeno en el bioabono fuera mayor que en el sustrato y que una pequeña cantidad de nitrógeno no se convierta en amonio sino en nitrógeno gaseoso que sale con el biogás. Al ser un inerte este nitrógeno no necesita ser retirado del biogás a menos que cause un problema de concentración, pero ese no es el caso.

3.5.8. Fósforo

El fósforo es un componente cuya reducción es esperada pues es una molécula que es asimilada por los microorganismos para permitir lo que es el crecimiento de estas. Esto

se debe principalmente a que el fósforo hace parte de las membranas celular que poseen las bacterias que hacen parte de este proceso [53]. Además, el fósforo se utiliza para la fermentación de los carbohidratos, es cofactor en diferentes pasos metabólicos y además de la membrana, también forma la estructura del ATP, ácidos nucleicos y algunas paredes celulares.

Tabla 36

Valores de fósforo en entrada y salida del biodigestor.

Cantidad de fósforo		
Componente	Sustrato	Bioabono
Fósforo (%)	0,50%	0,19%
Fósforo (kg/día)	30,14	11,30

Nota. No se tuvo en cuenta el biogás pues en este no hay presencia de fósforo.

La disminución de este compuesto indica una gran actividad metabólica de las bacterias presentes. Sin embargo, al quedar una tercera parte de lo que había inicialmente, puede indicar que el sustrato podía permanecer un poco más en el biodigestor.

3.5.9. Potasio

El potasio es un mineral asociado a la bomba de sodio y potasio que permite la entrada de diferentes compuestos al interior de los microorganismos. También, hace parte de la pared celular de algunas bacterias y es cofactor de diferentes procesos metabólicos. Por ello, a medida que hay crecimiento bacteriano y se estimula el metabolismo de estos, se espera que el mineral disminuya en su concentración. [54][55]

Tabla 37

Valores de potasio en entrada y salida del biodigestor.

Cantidad de potasio		
Componente	Sustrato	Bioabono
Potasio (%)	1,05%	0,01%
Potasio (kg/día)	63,29	0,59

Nota. No se tuvo en cuenta el biogás pues en este no hay presencia de potasio.

Como se puede observar la cantidad de potasio que se utilizó por parte de los microorganismos fue muy alta. Puede que este sea el reactivo limitante a la hora de que los microorganismos produzcan más biogás dentro del biorreactor. Por ello, es necesario evaluar alguna forma de compensar las grandes pérdidas de este compuesto.

Un valor de 0,04% de potasio fue el obtenido en la caracterización de bioles de Tlaxcala para un tiempo de retención de 35 días. Por lo tanto, es normal ver la significativa disminución de este mineral posterior a la biodigestión.[48]

3.6. Bioabono

Los excrementos suelen ser utilizados como abono sin ningún tratamiento previo. Los ganaderos tienden a dejar a su paso el estiércol esperando que las condiciones ambientales permitan su degradación y que el pastizaje absorba los nutrientes que este contiene. Esto puede durar varios meses pues el estiércol sin tratar no es utilizado con tanta facilidad por las plantas [56]. Sin embargo, este método tiene sus desventajas como la pérdida de nitrógeno, la posible producción de malos olores y, si no se realiza de forma apropiada, ocurre la aparición de moscas, entre otros insectos que pueden fomentar la aparición de enfermedades [57].

Es por esto por lo que se obtienen diferentes beneficios a la hora de someter al estiércol a la fermentación anaerobia. Uno de los cambios más importantes es en los macronutrientes y micronutrientes, pues la cantidad en el sustrato o en el bioabono no cambia, pero, si se vuelven más estables y menos susceptibles a cambios climáticos. Además, son más fáciles de absorber por parte de las plantas [31].

Otra ventaja es la destrucción de huevos de parásitos y protozoarios que se encuentran en el estiércol fresco y, por ende, se evita la transmisión de enfermedades. [58][31]

También, debido a la disminución de sólidos totales y al aumento de nitrógeno ocasionado por la digestión anaerobia, se estima que la relación carbono: nitrógeno del bioabono es de 10:1. Gracias a esta disminución en la relación, se espera una disminución notoria en la cantidad de microorganismos del bioabono, comparada con la del sustrato. Esto es una ventaja ya que la planta no tendrá que competir por el nitrógeno del suelo o del abono.[57].

Otra ventaja es el color de los suelos. El bioabono tiene un color oscuro por lo que, al ser aplicado en el cultivo, el color negro hace que haya mayor absorción de energía en forma de radiación solar [57].

Expone una mayor cantidad de ventajas de la utilización de este fertilizante orgánico cuyo mercado ha ido aumentando con los años.

Se ha encontrado que hay mercado para compra de bioabono a COP \$27000 por 8 litros de bioabono (el biol y biosol lo venden al mismo precio). Por lo que puede ser un subproducto del biodigestor que puede ser vendido o utilizado en el mismo hato para el cultivo de forraje [59].

3.7. Flujo de energía en el biodigestor

A pesar de que la temperatura del biodigestor sea en promedio 13°C, esta puede aumentar y disminuir a lo largo del día lo que variaría la producción de biogás.

En busca de evitar variaciones significativas en el flujo de biogás se recomienda la instalación de un sistema de control de temperatura que en caso de una temperatura por debajo de los 20°C aproveche la corriente cálida de gases de chimenea que se mencionará en el literal 6.5. o que en caso de una temperatura más alta permita la entrada de aire exterior para que la temperatura sea constante.

De igual manera, es necesario aclarar que la temperatura dentro del biodigestor no se ve significativamente afectada por la liberación de energía causada por las reacciones que ocurren dentro del sistema. La degradación de excretas en un biodigestor libera una cantidad de energía baja por lo que no se considera en el presente proyecto. [60]

4. TRATAMIENTO DE BIOGÁS

Luego del proceso de biodigestión, es importante resaltar que el biogás obtenido el cual se utiliza con la finalidad de aprovechamiento energético en un tanque de almacenamiento de agua previo al fotobiorreactor de Spirulina, para el análisis y los cálculos de todo el proceso se manejó desde la idealidad, es decir, no se tiene en cuenta la pérdida de carga por los sistemas de tuberías y equipos como bombas o compresores a lo largo del desarrollo de la investigación.

4.1. Composición del biogás crudo para el tratamiento

La composición del biogás producido por la digestión anaeróbica dependerá directamente del tipo de sustrato del cual se obtiene, en este caso la procedencia es de excretas de bovino que se encuentran dentro de la zona de ordeño, de igual manera la variabilidad de la composición depende del proceso de digestión anaeróbica del biodigestor como son la temperatura, el pH, tiempo de residencia, entre otras más.

Si se desea medir los gases que constituyen el biogás se debe utilizar una técnica analítica GC-TCD, el cual hace uso de un sistema multi válvulas y varias columnas que logran cuantificar el contenido en ppmv hasta un 100% v/v. Este método está basado en la norma ASTM D1945 (Standard Test Method for Analysis of Natural Gas by Gas Chromatography). [9]

A partir de la información donde se expone los rangos de la composición en la tabla 25, se define finalmente la composición como se observa en la tabla 38.

Tabla 38

Composición de biogás para el tratamiento.

Composición del biogás	%
CH ₄	60
CO ₂	36,95
H ₂	1
N ₂	1,75
CO	0,1
O ₂	0,1
H ₂ S	0,1

Nota. 1% equivale por lo general a 10.000ppm

4.2. Acondicionamiento del biogás

Cuando se realiza el proceso de generación de biogás por medio del biodigestor, el biogás se considera como crudo debido a que contiene partículas y trazas de otros gases que se producen dentro del biodigestor. El biogás crudo debe ser acondicionado, ya que contiene gases ácidos como el CO₂, y el H₂S, trazas de agua y otros componentes, a este proceso se le denomina endulzamiento, y según la norma se establece que el contenido de H₂S debe ser inferior a 3,3 ppm y de CO₂ inferior a 50 ppm, aunque como la finalidad del biogás es para un sistema de combustión, horno, en el cual las trazas de CO₂ no afectan la cámara donde ocurre la reacción.[61]

Adicionalmente se realiza el tratamiento para cumplir los requerimientos que son obligatorios para realizar el proceso de combustión con el fin de garantizar seguridad, pues el compuesto de sulfuro de hidrógeno es tóxico para los humanos y corrosivo para los equipos. Los procesos de purificación y acondicionamiento del biogás se pueden subdividir en tres fases según sea su finalidad. [9]

La primera fase se denomina el secado, que está específicamente enfocada hacia la eliminación de las trazas de agua presente en el biogás, luego está la remoción de sulfuro de hidrógeno (H₂S) que está presente en la mezcla del biogás crudo y finalmente la

remoción de dióxido de carbono (CO₂) para así aumentar la concentración de metano (CH₄) en el biogás, pero para determinar el acondicionamiento más adecuado se debe tener en cuenta la finalidad del biogás a la cual será utilizado.[62]

Los componentes azufrados, también se les define como sulfuro de hidrógeno (H₂S) y sulfuro de carbonilo (COS), estos compuestos tienen una reglamentación sobre los límites de calidad para el gas natural, debido a las características similares correspondientes a la composición del biogás, la resolución de la CREG será la base que permite dar la especificidad de los rangos límites en Colombia.

De los usos más sencillos y comunes con el que se suele dar utilidad al biogás es para la producción de calor o vapor, este puede proporcionar la energía calórica para cocinar, calentar agua o hasta producir iluminación.

Tabla 39

Tratamiento según el uso final del biogás.

Uso final	Eliminación		
	de trazas de agua	de Eliminación del CO ₂	Eliminación del H ₂ S
Producción térmica en calderas	1	0	0-1-2
Producción de electricidad en motores estacionarios	1-2	0-1-2	1 o 2
Combustible para vehículos o turbinas	2	2	2
Sustitución del gas natural	2	2	2
Celdas de combustible	2	2	2

Nota. 0= no tratamiento, 1=tratamiento parcial, 2=tratamiento elevado. Tomado de: FAO, MINENERGIA, PNUD, and GEF, “Manual del Biogás,” *Proy. CHI/00/G32*, p. 120, 2011, [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>.

Según la comisión de regulación de energía y gas (CREG) y la norma técnica colombiana (NTC) 4282 [63], donde establece las condiciones de instalación para el suministro de gas destinado a procesos industriales, debe cumplir con los requisitos referentes a la

protección y hermeticidad de las tuberías donde fluye el gas, además establecer métodos de acoplamiento y protección y hermeticidad de las tuberías para que no presente ninguna falla o fuga, así mismo métodos de acoplamiento y protección contra la corrosión de los equipos o las tuberías.[64]

Como se observa en la tabla 39, los diferentes tratamientos necesarios según el uso al cual se le va a dar al biogás, será el uso como agente combustible para calentar agua. Teniendo en cuenta la aclaración del uso final del biogás, para la eliminación de las trazas de agua, se va a realizar un tratamiento y así mismo para la eliminación del sulfuro de hidrógeno (H_2S). En el caso de la eliminación del dióxido de carbono (CO_2), no se va a utilizar un tratamiento parcial, ni elevado, ya que el proyecto de investigación no va enfocado hacia la eficiencia del proceso de combustión, si no hacia la generación de dióxido de carbono suficiente por medio de la combustión del biogás para la alimentación del fotobiorreactor.

4.2.1. Tipos de remoción de las trazas de agua

Es común encontrar el biogás trazas de agua cuando sale del biodigestor, por la humedad relativa que se encuentra internamente dentro del sistema de digestión. Por esta razón se reduce la humedad por niveles inferiores al del 60% para garantizar que no se genera taponamiento en las tuberías o corrosión en los equipos.[62]

4.2.1.a. Secado por condensación con trampa de condensado. Consiste en el cambio de fase del agua, de estado gaseoso al estado líquido disminuyendo la temperatura por debajo del punto de rocío. Por donde está siendo transportado el biogás también hay una manera sencilla y económica que consiste en diseñar un sistema de trampa en forma de U para capturar el agua u otro proceso más riguroso es en realizar un sistema de rocío sobre la tubería con agua fría teniendo en cuenta que no se puede llegar al punto de congelamiento. Cualquiera de estos métodos por condensación debe finalizar con un mecanismo que facilite el drenado de la tubería.[62]

4.2.1.b. Secado por absorción. La técnica consiste en el uso de material absorbente sólido para atrapar la humedad, por lo general los materiales más comunes para este proceso son el gel de sílice, los óxidos de aluminio, también el glicol. Aunque este último

es un material líquido su funcionamiento es haciendo uso de un flujo en contracorriente con el biogás a presión y temperatura fija.[62]

4.2.2. Tipos de remoción de sulfuro de hidrógeno

El sulfuro de hidrógeno (H₂S), como se mencionaba anteriormente, debe ser eliminado por dos razones principales, la principal consiste en evitar accidentes por envenenamiento en personas que puedan llegar a estar expuestas a este compuesto, aun siendo en concentraciones bajas. También es importante evitar el daño de equipos, en la tabla 40, se puede observar las concentraciones máximas permitidas de este compuesto según el uso final del biogás. Se ha determinado que los biodigestores que generen concentraciones mayores a 2500 ppm, es considerado altamente tóxico y letal, por lo general los biodigestores que se alimentan con residuos de estiércol porcino o bovino generan altos contenidos de sulfuro de hidrógeno. [62]

Tabla 40.

Requerimientos de pureza para el uso de biogás.

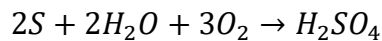
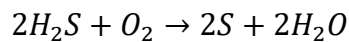
Tecnología	Requerimientos
Calderas	H ₂ S < 1000ppm. Se debe remover el condensado
Estufa de cocina	H ₂ S < 1000ppm. Se debe remover el condensado
Motores de combustión interna	H ₂ S < 100ppm. Se debe remover el condensado y los siloxanos.
Motores de combustión externa (Motores Stirling)	H ₂ S < 1000ppm. Se debe remover el condensado
Celda de combustión	H ₂ S en un rango entre < 1ppm y < 20 ppm dependiendo el tipo de celda
Reemplazo de gas natural (para inyección en tubería)	H ₂ S < 4ppm. CH ₄ > 95%, CO ₂ < 2% volumen. H ₂ O < 1 ×10 ⁻⁴ . No puede tener siloxanos ni particulados

Nota. Especificaciones necesarias para determinar el tipo de filtración. Tomado de: Z. Sidartha, J. C. Mendoza, L. S. González, F. L. Kaiser, and A. Gebauer, “Guía de Biogás

para el sector porcícola en Colombia,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2020.

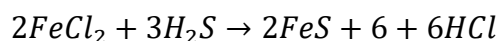
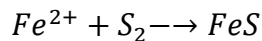
4.2.2.a. Desulfuración biológica. Para este proceso se utiliza microorganismos que realizan dentro de su metabolismo una oxidación de H_2S a el compuesto de azufre elemental. Este tipo de oxidación se denomina quimiolitotrofa y ocurre con o sin oxígeno. Los microorganismos dentro de los cuales ocurre este tipo de reacciones son *Beggiatoa*, *Xanthomonas* y, especialmente, *Chlorobium*, *Thiobacillus* y *Sulfolobus*. [62]

Las reacciones que ocurren en este proceso son:

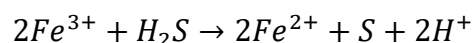


Se necesita carbono y sales como nitrógeno, potasio y calcio para que ocurran estas reacciones. Al ser aerobios facultativos, que toleran la ausencia y la presencia de oxígeno, es necesario una tasa de alrededor de 4-6% de biogás para que se desarrollen. [62]

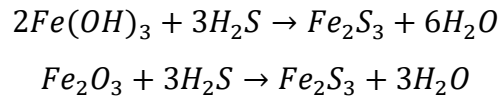
4.2.2.b. Precipitación de sulfuros. Para este proceso que consiste en la precipitación de compuestos, se necesita de un tanque de mezclado y una bomba de dosificación. La reacción que ocurre funciona a partir de iones Fe^{2+} en forma de cloruro de hierro que generan la precipitación del azufre. [62]



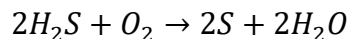
4.2.2.c. Absorción en solución férrica quelante. Este equipo consiste en un recipiente que contenga las soluciones quelantes o ligandos con hierro en una concentración entre 0.01 a 0.05% en peso, al cual se le suministra el biogás y aire. El azufre elemental S^0 se concentra en el fondo del recipiente, por ello requiere manejo manual para remover lo sedimentado. Estas soluciones tienen iones de hierro Fe^{3+} que se reducen a Fe^{2+} , en este instante el H_2S se oxida como se ilustra a continuación. [62]



4.2.2.d. Absorción por compuestos de hierro. En este proceso se utiliza un tipo de desulfuración seca por medio de la absorción de hidróxido de hierro ($Fe(OH)_3$) u óxido férrico (Fe_2O_3). La masa de hidróxido de hierro se aglomera de capa en capa en la torre desulfuradora, que se encuentran impregnadas en una lana de acero.[62]

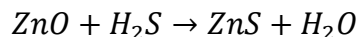


4.2.2.e. Adsorción en carbón activado. Dentro de los métodos más comúnmente utilizados para remover este compuesto es el uso de carbón activado al cual se le impregna yoduro de potasio (KI) como catalizador a una concentración entre 1%-5% según sea la cantidad de H_2S en el biogás con el fin de aumentar la velocidad de oxidación convirtiendo el H_2S en azufre elemental (S). Para el H_2S , dentro del sistema de absorción, se disuelve con una capa de agua sobre el carbón, para garantizar que no reaccione con el oxígeno se debe mantener temperaturas bajas entre $50^\circ-70^\circ C$ dentro de la columna de absorción y una presión de operación de 7 a 8 bar.[62]



Dentro de las ventajas de utilizar el yoduro de potasio para aumentar la velocidad de reacción, es que previene la formación de ácido sulfúrico porque el potencial de oxidación para la reacción se vuelve bajo. Otro de los catalizadores comúnmente utilizados puede ser el carbonato de potasio o permanganato de potasio.

4.2.2.f. Enlace químico con zinc. Este tipo de desulfuración consiste en un cartucho que contiene óxido de zinc ZnO , este tipo de purificación es para biogás crudo a bajas concentraciones de sulfuro de hidrógeno. Por lo general este tipo de dispositivos deben ser reemplazados con constancia.[62]



4.3. Acondicionamiento final del biogás

Una vez establecida la finalidad con la cual se va a utilizar el biogás, para este sistema de combustión se debe de tener en cuenta la remoción de las trazas de agua y la

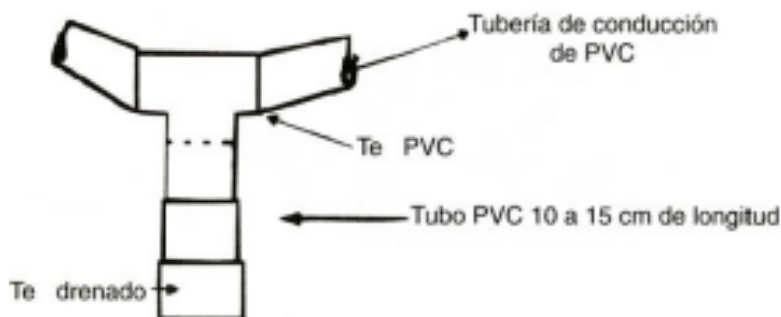
remoción de sulfuro de hidrógeno, con el fin de garantizar los parámetros mínimos de calidad.

4.3.1. Remoción de las trazas de agua

Como se mencionaba anteriormente, es común que, a la salida del biodigestor el biogás presente trazas de vapor. La medida de control que se determinó para el sistema es realizar una trampa de agua en el cual se almacenará en la parte inferior las trazas como se observa en la figura 24. Se pueden añadir varias trampas de vapor posterior al almacenamiento del biogás crudo, con el fin de garantizar una humedad relativa menor al 60%. [65]

Figura 24

Esquema de diseño de trampa de condensado en tubería PVC.



Nota. Representación para remover el vapor del biogás

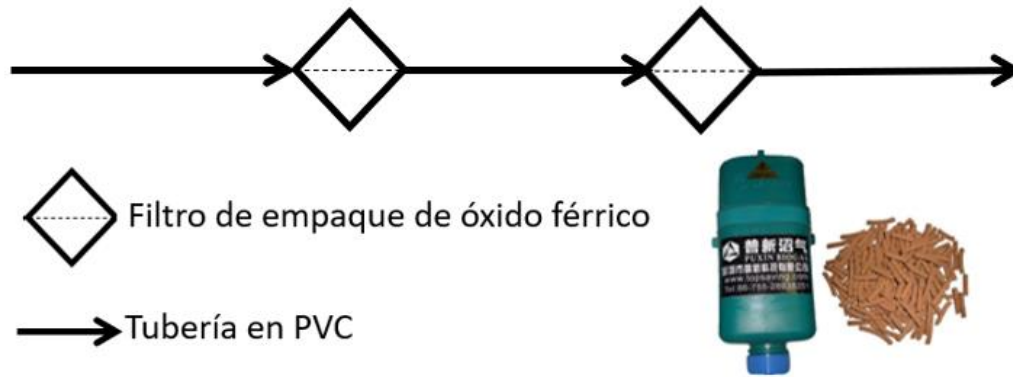
Fuente: S. N. de A. (SENA), "Biodigestor tipo salchicha o taiwan.pdf," *El biodigestor de plástico familiar*. p. 18.

4.3.2. Remoción de sulfuro de hidrógeno (H_2S)

Para la remoción del compuesto, se realizará la absorción con óxido férrico (Fe_2O_3); contenido en un 33% dentro del empaque, la porosidad es de 60% en su totalidad, así mismo tiene una capacidad de filtrado de biogás de $50m^3/día$, en la figura 2 se observa el filtro empacado. Para este sistema se toma dos empaques para satisfacer los $83 m^3/día$ de biogás generado en serie para así garantizar la remoción. Este sistema se puede observar en la figura 25.

Figura 25

Empaque de filtro de óxido férrico.



Nota. Representación del diseño de la tubería según los filtros. Tomado de: PUXIN, “Auxiliar Agent Chemical.” [https://spanish.alibaba.com/product-detail/renewable-energy-mini-biogas-storage-plant-](https://spanish.alibaba.com/product-detail/renewable-energy-mini-biogas-storage-plant-60611769581.html?spm=a2700.shop_plgr.41413.17.628a13bbdMMX6J)

60611769581.html?spm=a2700.shop_plgr.41413.17.628a13bbdMMX6J.[66]

4.4. Composición final después del pretratamiento

Luego del acondicionamiento del biogás, los compuestos de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el contenido de humedad se encuentran dentro de los rangos ideales para el correcto funcionamiento de cualquier sistema de combustión de metano sin ser perjudicial para el sistema de operación. El resultado final se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 41

Composición del biogás tratado.

Composición del biogás	%
CH4	60
CO2	37,04
H2	1
N2	1,75
CO	0,1
O2	0,1
H2S	0,01

Nota. Los datos fueron elaborados a partir del valor inferior de un rango establecido.

4.5. Instrumentos de control para el acondicionamiento

4.5.1. Tanque de almacenamiento

El biogás se almacena en una cúpula o tanque de almacenamiento suave de mezcla completa del metano. Tendrá una capacidad 5-100m³, prototipo al de un tanque de SGS incombustible del depósito de fermentación del biogás, donde permanece el volumen de biogás producido durante cinco horas según lo recomendado.[9]

La capacidad de este tanque de almacenamiento se determina teniendo en cuenta el flujo de biogás, teniendo en cuenta que el proceso de combustión de biogás es continuo a lo largo de la generación de biogás, es decir 24 horas por los 7 días de la semana, teniendo en cuenta que en el numeral 3.5.1. por medio de la ecuación 22, se estableció una tasa de 83,06m³ de biogás, en términos por hora será de 3,46m³/h. A partir de allí se estima que el rango de capacidad del tanque debe estar entre 6-7 m³ para garantizar la reserva de biogás [9]. En la figura 26 se puede observar un tipo de almacenaje.

Figura 26

Tanque de almacenamiento en forma de cúpula.



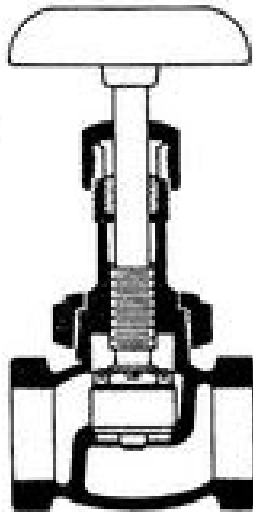
Nota. Representación del tanque de almacenamiento de la salida del biogás. Tomado de: T. Tanks, “UV Protection Methane Gas Storage Tanks, PVC Coated Fabric for Biogas Plant,” *TPU Sift Methane Biogas Storage*, 2010. <https://www.tarpaulintank.com/sale-10760012-uv-protection-methane-gas-storage-tanks-pvc-coated-fabric-for-biogas-plant.html>

4.5.2. Válvula de alivio

Para este tipo de procesos en donde se utiliza el biogás, que tienen solamente dos vías, es importante utilizar una válvula que regule la circulación, que no sea de cierre o apertura total. Para el diseño de la zona de acondicionamiento se recomienda utilizar una válvula de bola, como se observa en la figura 27, ya que tiene un control preciso de la circulación, disminuye la erosión y regula de manera eficiente el biogás.[67]

Figura 27

Válvula de globo.



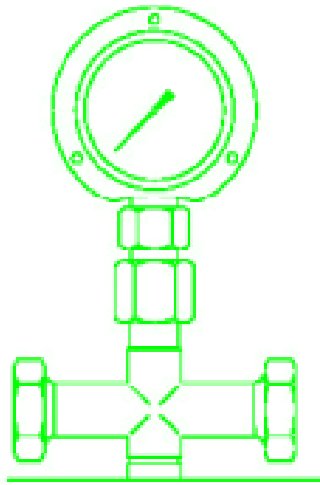
Nota. Esquema que evidencia el tipo de válvula en las tuberías. Tomado de: R. G. Soutullo, “Los Diferentes Tipos de Válvulas,” *Ing. Mar.*, 2013, [Online]. Available: <https://ingenieromarino.com/valvulas-a-bordo/>.

4.5.3. Manómetros

Para la medición de la presión, en el caso del biogás que se encuentra dentro de la tubería, es importante disponer de manera rápida y sencilla el nivel, ya que, si el sistema no maneja una presión adecuada, los demás equipos presentarían problemas al momento de accionar. Se recomienda un manómetro en esfera tipo bourbon, que se expone en la figura 28, pues no solamente muestra rangos de presión entre 0 a 10 bar, este dispositivo está compuesto por un sensor de temperatura que mide entre el rango de 0 a 120°C, este tipo de dispositivo es eficiente, ya que da un control de dos variables en un mismo punto. [68]

Figura 28

Representación de un manómetro tipo esfera.



Nota. Este dispositivo se puede llegar a manejar en el sistema de tuberías del biodigestor para verificar la presión interna. Tomado de: WEISZ, “Montaje, utilización y mantenimiento de manómetros.” no. 01, pp. 1–12, 1928.

4.5.4. Sistema de distribución de biogás

Es importante garantizar un sistema que produzca el desplazamiento adecuado, en este caso de PVC, para el biogás a la salida a los demás sistemas porque de esa manera se brinda seguridad y un correcto funcionamiento hacia el tanque de almacenamiento de biogás y los métodos de filtración. [69] En la figura 29 se puede ver el tipo de tubería recomendado.

Figura 29

Sistema de distribución de tuberías en PVC.



Nota. Se recomienda que el sistema sea a partir de PVC para lugares rurales para cuando son un sistema doméstico. Tomado de: C. De Instalaciones, "Tubos y Accesorios de PVC Conduit Cuando usted especifique Tubos y Accesorios de Presentación Doblado de Tubería Para doblar y formar Tubos de PVC Conduit DURMAN ESQUIVEL , siga los pasos que a continuación indicamos :," 2005.

5. CÁMARA DE COMBUSTIÓN

El biogás que se produce a partir del proceso de la digestión anaeróbica, el cual está compuesto principalmente por metano (CH_4) en un 60% y dióxido de carbono (CO_2) en 36.95%, permite proporcionar una cantidad de energía alta por medio de la combustión en distintos dispositivos como motores de combustión, calderas, lámparas de iluminación, quemadores domésticos o industriales, entre otras más. Este tipo de dispositivos deben tener un sistema interno apropiado para una eficiente reacción entre el biogás y el comburente.

5.1. Disponibilidad de biogás

El biogás generado por el biodigestor es de 83,03 $\text{m}^3/\text{día}$, según el capítulo 3 del proyecto. Se estima que el biodigestor tiene un funcionamiento anual de 365 días.

5.2. Relación metano-oxígeno para la combustión

Para analizar la mejor relación metano-oxígeno dentro de la combustión, es importante hablar sobre los compuestos implicados y no implicados dentro de la reacción y el rango de inflamabilidad. El aire, el comburente de la reacción, está compuesto de 21% de oxígeno (O_2) y 79% de nitrógeno (N_2), es decir, que por cada molécula de oxígeno existe 3.76 moléculas de nitrógeno, pero dentro de la reacción, el nitrógeno no reacciona con el oxígeno, es una molécula inerte. [70]

Por lo general los reactivos de metano (CH_4) y oxígeno (O_2) antes de realizar la reacción se encuentran en temperaturas promedio de 20°C , para lograr que estos compuestos reaccionen, se debe garantizar una fuente de ignición, al lograr por medio de una fuente externa el punto de incendio, que está relacionado con las condiciones físico- químicas necesarias para que el metano se encienda en contacto con el oxígeno, se produce una combustión completa y duradera cuando se retira la fuente externa de ignición. [70]

De manera que, cuando se realiza la combustión de metano, lo más importante a garantizar para la reacción es que, el combustible se encuentre dentro del rango de explosividad con relación al oxígeno que está dentro del aire y la temperatura de reacción que logre una combustión completa.

5.2.1. Rango de inflamabilidad

Para que la reacción de combustión del biogás, el metano se debe inflamar cuando se mezcla con el oxígeno. Para determinar el porcentaje ideal de esta mezcla a partir de los rangos de inflamabilidad, se estudia a partir de dos conceptos que garantizan la llama del metano, se denominan límite inferior de inflamabilidad (LIL), el cual es la concentración mínima de gas en el aire por debajo de la cual no se genera llama, y el límite superior de la inflamabilidad (LSI), que especifica el máximo de concentración de gas en el aire, el cual por encima de ese valor no se forma llama.

El biogás producido por el biodigestor, como se mencionaba anteriormente, está compuesto principalmente de metano, este gas que también se le conoce gas natural su límite inferior de explosividad es del 5%, es decir que en un porcentaje de volumen como mínimo debe haber 5% de metano y 95% de aire, y el límite superior de explosividad es de un 15%. [70]

Con base en esta información, se realizó el cálculo de la relación metano-oxígeno evaluado desde tres puntos distintos, el límite superior de explosividad, el límite inferior y el promedio dentro de ese rango así mismo se tuvo en cuenta tres porcentajes de volumen distintos de metano presente en el biogás, como se muestra en tabla 42.

Tabla 42.

Comportamiento de la relación metano-oxígeno.

	Porcentaje de metano presente en la mezcla biogás-aire	Porcentaje de metano en el biogás %		
		Mínimo	Promedio	Máximo
		50	60	70
Relación	5%	3,78	3,85	3,85
O2-metano	15%	0,98	1,05	1,1

Nota. Los datos se calcularon a partir de promedios según la composición del biogás obtenido.

A partir de la tabla 42, se observa que a mayor porcentaje de metano en el biogás aumenta la relación oxígeno-metano, ya sea dentro del rango mínimo o máximo de inflamabilidad.

A partir de ese estudio, para el proyecto se tiene en cuenta la composición del biogás acondicionado, el cual tiene un porcentaje del 60%, además teniendo en cuenta que se toma como el rango mínimo de inflamabilidad del 5% en metano en la mezcla, la composición de toda la mezcla para la combustión se muestra en la tabla 43.

Tabla 43.

Composición de la mezcla final entre el biogás y el aire.

	Composiciones	%	Flujo Volumétrico m³/h	Flujo másico kg/h
Biogás	CH ₄	0,05	41,53	39,47
	CO ₂	0,05	39,08	37,14
	Impurezas	0,003	2,45	2,32
Aire	N ₂	0,71	590,58	561,31
	O ₂	0,19	156,99	149,21
	Total		830,63	789,47

Nota. Los cálculos se realizaron a partir del cálculo del aire en exceso que ingresa a la cámara de combustión, datos que se desarrollan en el numeral 5.4.2

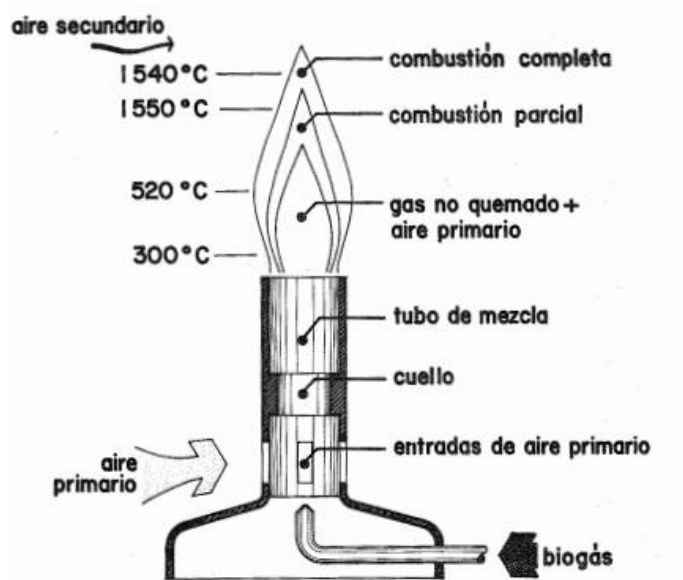
5.2.2. Temperatura de combustión

Por la gran proporción de dióxido de carbono presente en el biogás, la temperatura de la llama se reduce generando problemas de estabilidad en la llama, por lo que si no hay estabilidad podría producirse combustión incompleta y generar gases inquemados como el monóxido de carbono y hollín, de manera que se recomienda realizar previo a la cámara de combustión, un sistema de premezcla entre el biogás y el aire seleccionado en la sección del rango de inflamabilidad. [71]

Al garantizar una premezcla, la llama será azul y completa en temperaturas superiores de 540°C [71], es decir, es eficiente como se puede observar en la figura 30.

Figura 30.

Llama ideal de biogás según la temperatura.



Nota. El aire secundario o aire adicional proviene de la atmosfera por tener una cámara de combustión con agujeros que permiten más entrada de oxígeno. Tomado de: I. de I. y T. I. Centroamericano, “Biogás Y Bioabono,” 1985, [Online]. Available: <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00199.pdf>.

Muchas veces los procesos de combustión presentan problemas que se pueden identificar por el color de la llama, en la tabla 44 se describen diagnósticos comunes de la reacción y la manera de solucionarlo.

Tabla 44.*Problemas comunes dentro de las cámaras de combustión.*

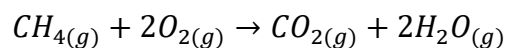
Problema	Causas posibles	Posibles soluciones
Llama larga y amarillenta	Déficit de aire primario/ Exceso de combustible	Aumentar entrada de aire/ Reducir paso del biogás
Llama despega del quemador	Alta presión y velocidad del gas	Reducir entrada aire primario
Llama débil y se extingue	Baja velocidad del gas en la tobera	Aumentar diámetro del inyector
		Limpiar orificio de inyección obstruido/ Incrementar diámetro
Llama muy pequeña	Déficit de combustible	de de orificio de descarga
Manchas amarillas en llama	Déficit de aire primario	Ampliar entrada de aire primario

Nota. Esta información logra brindar prevención en caso tal de presentarse alguna de estas situaciones. Tomado de: I. de I. y T. I. Centroamericano, "Biogás Y Bioabono," 1985, [Online]. Available: <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00199.pdf>.

5.3. Análisis de combustible

Para determinar la cantidad de calor producida considerando una combustión completa del biogás, en donde la reacción permanece a presión constante y las trazas de agua contenida en los gases de la combustión no condensa, se dispone solamente del calor de oxidación al cual se define poder calorífico inferior del combustible (PCI). [72]

Para obtener el PCI, es necesario tener en cuenta la temperatura del biogás, la cual sería 20°C y la composición definida en la tabla 38 de metano con base a las entalpías.



5.3.1. Poder calorífico inferior del biogás

El método para determinar este poder calorífico se basa en que todos los compuestos del biogás aportan energía con base en que se encuentra en una mezcla ideal gaseosa en términos volumétricos, por ello se tiene en cuenta la fracción según cada componente.[73]

Para tomar el valor de poder calorífico del metano, se basa a partir de la siguiente ecuación 26.

Ecuación 26

$$PCI_{biogás} = X_{metano} * PCI_{metano} \quad (26)$$

$$PCI_{biogás} = \text{Poder calorífico inferior del biogás}$$

$$PCI_{metano} = \text{Poder calorífico inferior del metano}$$

$$X_{metano} = \text{Porcentaje de metano en el biogás}$$

Para calcular el poder calorífico del metano, se realiza a partir de las entalpías de formación de la reacción de combustión entre el oxígeno.

La molécula de metano (CH₄) tiene una unión química de manera covalente, en donde la energía se desprende de manera exotérmica con valores de calor negativos. La fuerza estabilizadora por naturaleza del metano, o también denominada entalpia de formación o calor de formación, la cual se encuentra en tablas termodinámicas, aporta información para calcular el calor de la reacción de combustión.[73]

$$\Delta H_{fCH_4}^{\circ} = -74,6106 \frac{kJ}{mol} ; \Delta H_{fCO_2}^{\circ} = -394 \frac{kJ}{mol} ; \Delta H_{fH_2O}^{\circ} = -242 \frac{kJ}{mol}$$

Ecuación 27

$$\Delta H_{RxnCH_4}^{\circ} = 2 * \Delta H_{fH_2O}^{\circ} + \Delta H_{fCO_2}^{\circ} - \Delta H_{fCH_4}^{\circ} \quad (27)$$

$$\Delta H_{RxnCH_4}^{\circ} = -803,39 \frac{kJ}{mol} = -803.389,4 \frac{kJ}{kmol}$$

Para determinar la energía desprendida por kilogramos de metano, se realiza la conversión utilizando el peso molecular del metano y la densidad de este. [74]

$$PM_{\text{metano}} = 16.04 \text{ kg/kmol}$$

$$PCI_{\text{metano}} = -803.389,4 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} * \frac{1 \text{ kmol}}{16 \text{ kg}} = 50.086,61 \frac{\text{kJ}}{\text{kg CH}_4}$$

$$PCI_{\text{biogás}} = 0,6 \text{ CH}_4 * 50.086,621 \frac{\text{kJ}}{\text{kg CH}_4} = -30.051,97 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

A partir del poder calorífico del gas, se logra calcular la energía de combustión que desprende teniendo en cuenta el flujo másico de biogás obtenido en el proceso con base a la siguiente ecuación:

Ecuación 28

$$E_{\text{combustión}} = m_{\text{biogás}} * PCI_{\text{biogás}} \quad (28)$$

$$E_{\text{combustión}} = \text{Energía del combustible} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right)$$

$$m_{\text{biogás}} = \text{Flujo másico del biogás} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$$

$$E_{\text{combustión}} = 1,97 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * -30.051,97 \frac{\text{kJ}}{\text{kg CH}_4} = -59.312,87 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

5.3. Selección de la cámara de combustión

Escoger el tipo de cámara de combustión es importante porque se debe seleccionar un tipo de sistema que tenga necesidades energéticas suficientes del combustible según la tasa de biogás del sistema autosustentable, por lo que la tasa de biogás obtenida por día debe ser acorde a las características de la cámara de combustión.

Existen diferentes dispositivos para el aprovechamiento del biogás generado según las necesidades que se tenga, en la tabla 45 se puede encontrar diferentes tipos de sistemas de aprovechamiento energético del biogás.

Tabla 45.*Dispositivos para el aprovechamiento del biogás.*

EQUIPO	Características	Función
Estufa	Comúnmente se encuentra estos dispositivos como estufas de barro o de metal, a los cuales se le instala quemadores de bajo costo, para el diseño de este sistema se toma en cuenta el poder calorífico que se obtiene, presión de entrada del biogás, propiedades del aire tanto del biogás y la forma de combustión según el consumo del quemador, para de esta lograr determinar el número de hornillas y quemadores. La calidad del biogás no es tan estricta para estos dispositivos.	Cocción de alimentos, sustitución de la leña, gas propano o el keroseno. El dispositivo se encarga de que el aire y el biogás generen combustión.
Motores estacionarios de combustión interna	Mediante la adaptación de un motor de gasolina o Diesel para la combustión de biogás, estos sistemas cuentan con una adaptación en la forma del carburador, tubos de hierro o de plástico que garantizan presión constante. Por el poder calorífico del biogás, es necesario añadir gasolina en el carburador para arrancar el sistema de combustión. Este equipo requiere mucho más control de las variables del proceso y es mucho más costoso además el biogás debe haber sido acondicionado de tal manera que no haya presencia de ninguna traza, no mayor a 10ppm de subproductos para un buen funcionamiento del equipo.	Permite accionar sistemas que generan energía eléctrica, también el funcionamiento de un sistema de bombeo.

Tabla 45. Continuación.

Lámparas	Este tipo de equipos pueden ser fabricados o modificados a bajo costo, pero el acondicionamiento del biogás debe ser muy similar al del tratamiento del gas natural puro para un buen funcionamiento. Se realiza a partir de un tubo de vidrio tipo Pyrex para resistir altas temperaturas produce aproximadamente entre 40-60 vatios, así mismo el sistema requiere que el biogás entre a una presión entre 7,5-10 cm de columna de agua, por lo general el requerimiento de combustible es bajo a consecuencia del tamaño estándar de las lámparas por lo que se caracterizan de bajo costo. Existen varios tipos de cámaras tipo Coleman o tipo bastón.	Generación de luz a partir de la energía de combustión
Calderas	Tiene un sistema que dispone de un quemador de tiro forzado, que cuenta con electrodos internos de ignición, un ventilador y válvulas de control para la combustión. Es común encontrar caldera a partir de biogás tipo vertical con volúmenes entre 4 a 20 pies cúbicos. Para la selección del tamaño se tiene en cuenta la disponibilidad del biogás, las necesidades térmicas y la disponibilidad de agua. Para el uso de estos equipos es necesario de un compresor que controle el suministro de biogás a la caldera. La purificación del	Es un sistema que funciona para calentar agua o generar calor en forma de vapor, que se puede utilizar en sistemas de cocción de alimentos, generación de electricidad.

Tabla 45. Continuación.

	biogás deber ser alta para garantizar la conversión total del combustible.	
Hornos	Estos son diseñados según las necesidades del proceso teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas, Estos equipos están constituidos por un cerramiento metálico al cual se le reviste interiormente por una pared aislante que resiste altas temperaturas. Por lo general estos equipos cuentan con un quemador interno que libera el gas, que posterior a la reacción de combustión se liberan gases por la chimenea, estos gases proporcionan calor a otros sistemas por medio de un serpentín tubular por el cual circulan que entregan esa energía por la radiación entre la tubería y el fluido al cual se desea incrementar la temperatura.	Cumplen distintas funciones como realizar el precalentamiento de una corriente, evaporar los fondos de una columna de destilación o disminuir propiedades como la viscosidad o la densidad por medio del incremento de la temperatura

Nota. Este cuadro permite entrar a estudiar los sistemas más comunes de aprovechamiento del biogás. Tomado de: I. de I. y T. I. Centroamericano, "Biogas Y Bioabono," 1985 y A. Valverde G., B. Sarria López, and J. Monteagudo Yanes, "Evaluación De La Eficiencia Energética De Un Horno Que Utiliza Como Combustible Cascarilla De Arroz.," *Sci. Tech.*, vol. 5, no. 37, pp. 175–180, 2007, doi: 10.22517/23447214.4049.

La disponibilidad del biogás que se obtuvo durante el proceso de la biodigestión, luego de los días del tiempo de retención, es alta, por lo que el prototipo de aprovechamiento del biogás debe tener dentro de sus características una demanda de biogás de 1,97 kg/h, adicionalmente como la finalidad del proyecto es generar un sistema autosustentable, se espera capturar el CO₂ generado por la combustión del biogás para aprovechar el calor que emite por medio de la radiación.

Dentro de los equipos en la tabla 45, se observa que los sistemas de combustión como las calderas y los hornos son los sistemas que comúnmente requieren una tasa de biogás constante que logra fácilmente ajustar el tamaño para el aprovechamiento y desarrollar un tipo de chimenea que se distribuyan en una tubería.

Para determinar cuál de los equipos se va a tener en cuenta para desarrollar el proceso de aprovechamiento energético de los gases emitidos, al comparar los dos sistemas, las calderas son la mejor opción si se analiza desde de la eficiencia energética y térmica alta entre 85% y 95 %, pero tienen mayor costo en mantenimiento e instalación, además estos sistemas deben contar con un sistema de alimentación de agua para la generación de vapor, lo cual genera mayor consumo del servicio de agua. [76]

En cambio, los hornos tienen una eficiencia de alrededor del 70% al 95% según el diseño que se establezca, por lo general estos sistemas de combustión generan temperaturas de gases altas por lo que hará que el aprovechamiento de energía por tuberías pueda ser útil en los procesos posteriores, además el mantenimiento de estos equipos es a bajo costo y la construcción de un horno es mucho más económico. [77]

De manera que se desarrolla el proceso de combustión del biogás por medio de un horno de combustión, ya que la energía liberada por los gases es más alta, lo cual permite distribuirlo alrededor del diseño posterior, el cual es el fotobiorreactor.

5.4.1. Principios básicos del horno

Como se mencionaba anteriormente, las exigencias de los hornos funcionan a partir de las necesidades como son el tipo de combustible, que en este caso es el metano, también el quemador interno y la disposición de los flujos del combustible y del comburente. De

acuerdo con el diseño, se recomienda una forma cilíndrica o rectangular al momento de realizar la construcción.

Los hornos que tiene una forma rectangular son más eficientes para altas tasas de flujo de combustible, pues estos se adaptan a los espacios y logran mejor ubicación, pero dentro de las desventajas es que se pueden llegar a generar zonas frías, en cambio un horno cilíndrico promueve en toda el área la distribución de la energía, como se observa en la figura 31.[78]

Dentro de las otras recomendaciones de diseño de un horno, es que se garantice la buena circulación de aire y combustible, los gases deben fluir sin ser obstaculizados, esto se logra a partir de un buen diseño de conductos adecuados de los gases calientes según el tiro del horno. Así mismo, se debe generar una chimenea ancha y alta para los gases, pues un mal diámetro de salida no lograría evacuar los gases y aumentar la temperatura.[78]

Figura 31.

Diseño de horno a gas y sus partes.



Nota. Este sistema de horno es elaborado a partir de cerámica para garantizar altas temperaturas. Tomado de: M. Lozano, J. Ramírez, and C. Vásquez, “Manual de Hornos Cerámicos a Gas con Tecnología Apropriada,” 2013, [Online]. Available: <https://studylib.es/doc/6511209/manual-de-hornos---universidad-de-el-salvador>.

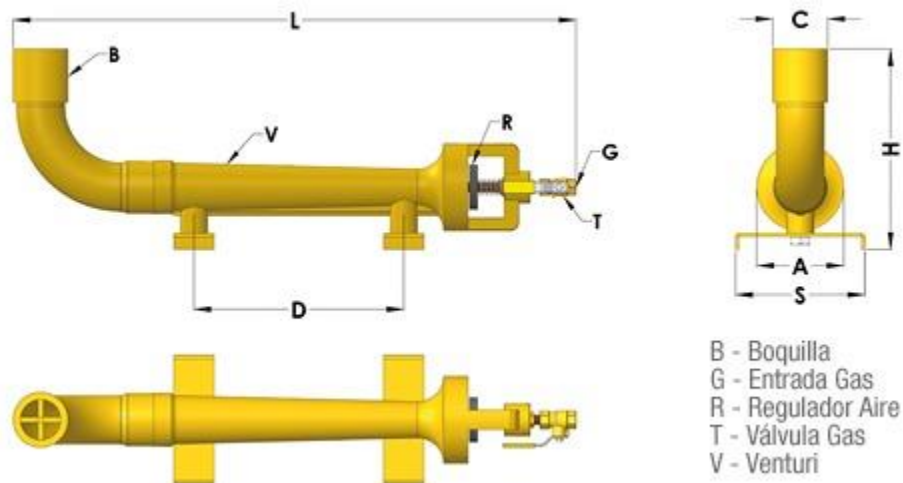
Teniendo en cuenta que una de las partes fundamentales del sistema de combustión es el tipo de quemador interno, debe contar con suficiente espacio para que el biogás se logre quemar antes de alcanzar toda la carga del horno. Existen distintos quemadores según el tipo de función tales como:

5.4.1.a. Quemador atmosférico. Dentro de los tipos de quemadores internos son los más sencillos, pues son a partir de hierro fundido, y el combustible se inyecta por un orificio conectado a un tubo que se regula el flujo de gas por medio de una válvula, el aire entra

en contacto cuando se ve arrastrado a través de unas aberturas internas como se observa en la figura 32.[78]

Figura 32.

Representación de un quemador tipo Venturi.

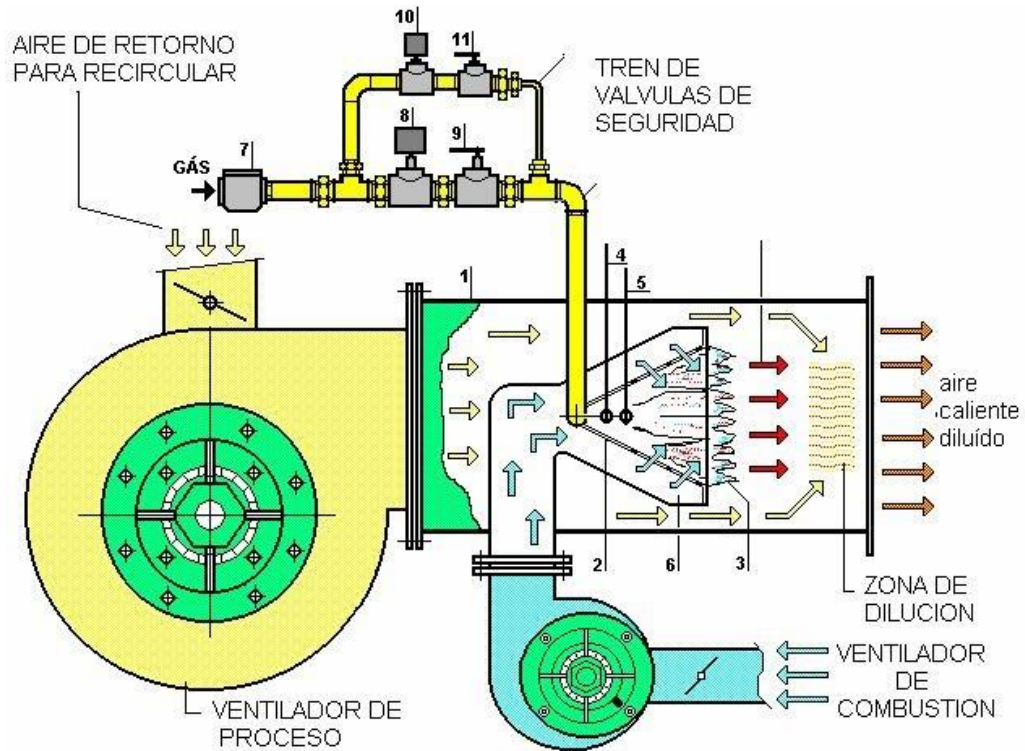


Nota. Este sistema garantiza una ideal premezcla entre el aire y el combustible. Tomado de: Herlogas, “Quemadores industriales HERLO, rampas de gas, armarios y componentes,” 2013. [Online]. Available: <http://www.herlogas.com/es/quemadores-industriales-rampas-gas-armarios-componentes.php>.

5.4.1.b. Quemador de aire forzado. Este quemador proporciona una mezcla perfecta entre el aire y el combustible, pues este consta de un ventilador interno a motor, en donde el aire procede por una válvula tipo mariposa y entra en contacto con el combustible por el tubo donde se introduce el gas, para luego esa mezcla ser inyectada al quemador donde arden como se observa en la figura 33 o también está el quemador que cuenta con un sistema de diafragma a partir de los accesorios de las tuberías como se plantean en la figura 34.

Figura 33.

Representación de un quemador de aire forzado.



Nota. Este sistema garantiza una ideal premezcla entre el aire y el combustible. Tomado de: G. Pereira, "Quemadores para calentamiento de aire Serie MJ3," no. 598 2, 2009

Figura 35.

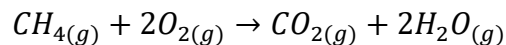
Sistema de combustión tipo Venturi con tubería.



Nota. Este sistema garantiza una ideal premezcla entre el aire y el combustible. Tomado de: G. Bermúdez, “Quemadores de calderas.” WordPress, 2011. [Online]. Available: <https://generaciondepotencia.files.wordpress.com/2011/03/quemadores-de-calderas.pdf>.

5.4.2. Balance de materia

A partir del sistema de combustión, el cual será el horno con un quemador interno tipo Venturi, se va a realizar una combustión completa, de tal manera que no se genera ninguna reacción secundaria. La reacción de combustión de metano presente en el biogás está representada de la siguiente manera:



Para establecer el balance de materia es necesario tener en cuenta el contenido de aire en exceso que se puede determinar a partir de la ecuación 29. Así mismo, al establecer que el sistema será un horno, se toma una eficiencia del 70% según [78], ese valor es el mínimo considerando la variación de pérdidas de energía en el ambiente por la construcción de este, esa eficiencia permite determinar la cantidad de metano reaccionado a partir de la ecuación 30.

Es importante mencionar que el valor de la eficiencia va directamente relacionado a la cantidad de combustible, el diseño del horno y el % de aire en exceso presente según [78], en donde establecen que a partir de las características del quemador seleccionado, el material de ladrillo para las paredes externas del horno y el sistema de aislamiento interno con la fibra.

Ecuación 29

$$\%O_2 \text{ exceso} = \frac{(n_{O_2 \text{ Alimentado}} - n_{O_2 \text{ Teórico}})}{n_{O_2 \text{ Teórico}}} * 100\% \quad (29)$$

Ecuación 30

$$\eta_{CH_4} = \frac{n_{reaccionadas CH_4}}{n_{alimentadas CH_4}} * 100\% \quad (30)$$

El balance global de salida de los gases por chimenea se puede expresar por la siguiente ecuación:

Ecuación 31

$$N_3 \text{ final} = n_{CH_4 \text{ final}} + n_{CO_2 \text{ final}} + n_{H_2O \text{ final}} + n_{N_2 \text{ final}} + n_{O_2 \text{ final}} \quad (31)$$

Para calcular el flujo de las corrientes de salida, se utiliza los datos que se muestran en la tabla 46, la cual proporciona información de las características de la composición del biogás después del tratamiento de las impurezas.

Tabla 46.

Composición de la entrada de biogás al quemador.

Características de la entrada de biogás					
	Peso molecular (kg/kmol)	Compuesto	% másico	Flujo másico de entrada kg/h	Flujo molar mol/h
Biogás	16,04	CH ₄	60,00%	1,97	123,04
	44,01	CO ₂	37,04%	1,21	27,68
	***	Impurezas	2,96%	0,09	**

Nota. Los cálculos correspondientes se realizaron a partir de los pesos moleculares de cada compuesto. **Para las impurezas no se encuentra un peso molecular constante, ya que es un parámetro dependiente de las condiciones de cada biodigestor, de modo que solamente se tendrá en cuenta el flujo másico de esta corriente.

Así mismo teniendo en cuenta el tipo de quemador seleccionado, se estima que el exceso de aire será del 40%. El exceso de aire evita la formación de combustión incompleta, pero para los hornos de combustión, el exceso no puede ser grande porque habría más presencia de O₂ generando que la salida de los gases de combustión pierda energía del carbón proveniente del metano presente del biogás, ya que necesitaría más energía para calentar el nitrógeno del aire. [78]

5.4.2.a. Balance metano. A partir de las ecuaciones 32, 33 y 34 se determinó las moles de salida de la chimenea, como se muestra en la tabla 47.

Ecuación 32

$$n_{alimentadas CH_4} - n_{reaccionadas CH_4} = n_{CH_4} \quad (32)$$

Ecuación 33

$$n_{reaccionadas CH_4} = n_{alimentadas CH_4} * \frac{\eta_{CH_4}}{100\%} \quad (33)$$

Ecuación 34

$$n_{CH_4 \text{ final}} = n_{\text{alimentadas } CH_4} - n_{\text{reaccionadas } CH_4} \quad (34)$$

Tabla 47.

Resultado del balance de materia de metano.

Balance del CH₄	
Moles alimentadas (mol/h)	123,04
Moles reaccionadas (mol/h)	86,13
Moles finales (mol/h)	36,91

Nota. Para el cálculo se realizó a partir de la eficiencia de combustión de los hornos

5.4.2.b. Balance de oxígeno. Para determinar las moles de salida de oxígeno, es necesario determinar la cantidad de entrada de aire teniendo en cuenta el porcentaje de aire en exceso el cual fue seleccionado, esta corriente se denomina moles alimentadas y se realiza a partir de la ecuación 35.

Ecuación 35

$$n_{O_2 \text{ Alimentado}} = n_{O_2 \text{ Teórico}} * (1 + \%Exceso) \quad (35)$$

El aire teórico se determina asumiendo una conversión completa de metano de entrada y el factor estequiométrico entre las moles de metano y el dióxido de carbono, la cual equivale a 2 con la ecuación 36.

Ecuación 36

$$n_{O_2 \text{ Teórico}} = n_{\text{reaccionadas } CH_4} \text{ con } \eta_{CH_4}=100\% * REn \quad (36)$$

Y las moles reaccionadas de oxígeno se calculan a partir de las moles de metano que reaccionan con la ecuación 37.

Ecuación 37

$$n_{O_2 \text{ Reaccionado}} = n_{\text{reaccionadas } CH_4 \text{ con } \eta_{CH_4}=70\%} * REn \quad (37)$$

Finalmente, para determinar la salida de oxígeno se calcula teniendo en cuenta la ecuación 38.

Ecuación 38

$$n_{O_2 \text{ Alimentado}} - n_{O_2 \text{ Reaccionado}} = n_{O_2} \quad (38)$$

Los resultados del balance de masa se observan en la tabla 48.

Tabla 48.

Resultado del balance de materia del oxígeno.

Balance del O₂	
Moles alimentadas (mol/h)	344,53
Moles reaccionadas (mol/h)	172,26
Moles teóricas (mol/h)	246,09
Moles finales (mol/h)	172,26

Nota. Para el cálculo se realizó, a partir de las moles teóricas, asumiendo combustión completa y moles en exceso al 40%

5.4.2.c. Balance de agua. Con base en la ecuación 40, menciona que la cantidad de vapor de agua de salida se debe tener en cuenta tanto el agua en forma de vapor contenida en la corriente de aire del horno, y así mismo la cantidad de agua que se produce por medio de la reacción de combustión.

A partir del flujo de entrada de oxígeno con base en la ecuación 35, se logró determinar la corriente de aire completamente estableciendo que el porcentaje molar de nitrógeno es del 79%, el oxígeno del 21%, así mismo para lograr determinar el contenido de vapor saturado dentro del aire, el cálculo correspondiente se realiza a partir de la ecuación 39 y la tabla 49 que describe las condiciones del aire.

Ecuación 39

$$n_{\text{Aire humedo entrada}} = \frac{n_{O_2 \text{ alimentadas}}}{\% \text{ Molar } O_2} \quad (39)$$

Tabla 49.

Características del aire en exceso en la laguna de Fúquene.

Características del aire de entrada al horno		%Humedad relativa	70
Temperatura de bulbo seco °C	13°C	Altitud m	2750
A partir del diagrama psicrométrico			
Presión (atm)	0,714	Entalpía (kJ/kg)	36,2
Humedad Absoluta (kg de vapor de agua/kg de aire seco)	0,009	Presión de Sat (atm)	0,0147

Nota. A partir de la humedad relativa promedio de la zona, la temperatura del aire de entrada y la presión atmosférica, se determina la cantidad de vapor de agua por kilogramo de aire seco.

Para determinar el contenido de agua de entrada, se utiliza la ecuación 40, en la ecuación se expresa la humedad absoluta, esta variable se observa a partir de la tabla psicrométrica y los resultados se pueden evidenciar en la tabla 50, y con base en la ecuación se puede determinar las moles de entrada de vapor.

Ecuación 40

$$HA = n_{H_2O \text{ inicial}} * \frac{\bar{M}_{H_2O}}{\bar{M}_{\text{aire seco}}} \quad (40)$$

Luego para determinar las moles formadas por medio de la reacción se realiza a partir de la ecuación 41, la cual se establece partiendo de una conversión total del metano y la relación estequiométrica entre el agua y el metano.

Ecuación 41

$$n_{H_2O\ final} = n_{H_2O\ reaccionadas} + n_{H_2O\ entrada} \quad (41)$$

Tabla 50.

Resultado del balance de materia del agua.

Balance de H₂O	
Moles alimentadas (mol/h)	23,92
Moles reaccionadas (mol/h)	172,27
Moles finales (mol/h)	196,19

Nota. Para el cálculo se realizó a partir de las moles generadas por la reacción de combustión completa de forma teórica.

5.4.2.d. Balance de dióxido de carbono. El flujo de salida se calcula a partir de la ecuación 42, la cual tiene en cuenta tanto las moles de entrada por parte del biogás y las que se producen a partir de la reacción de combustión. Para determinar las moles formadas de dióxido de carbono se realiza a partir de la relación estequiométrica entre el metano y el dióxido de carbono y asumiendo el consumo total del flujo de metano de entrada como se observa en la ecuación 43.

Ecuación 42

$$n_{CO_2\ formadas} = n_{reaccionadas\ CH_4\ con\ \eta_{CH_4}=100\%} * REn \quad (42)$$

Ecuación 43

$$n_{CO_2\ final} = n_{CO_2\ formadas} + n_{CO_2\ entrada} \quad (43)$$

Con base en las ecuaciones planteadas, los resultados se pueden observar en la tabla 51.

Tabla 51.

Resultado del balance de materia del dióxido de carbono.

Balance de CO₂	
Moles alimentadas (mol/h)	27,68
Moles reaccionadas (mol/h)	86,13
Moles finales (mol/h)	113,81

Nota. Para el cálculo se realizó a partir de las moles generadas por la reacción de combustión completa de forma teórica.

5.4.2.e. Balance de Nitrógeno. Este compuesto dentro de la reacción de combustión se establece como inerte pues no afecta la conversión o los productos de la reacción, de manera que para el cálculo del flujo de salida se realiza teniendo en cuenta la ecuación 44 y la ecuación 45. Los resultados se pueden observar en la tabla 52.

Ecuación 44

$$n_{N_2 \text{ entrada}} = \frac{n_{\text{aire alimentadas}}}{\%_{\text{Molar } N_2}} \quad (44)$$

Ecuación 45

$$n_{N_2 \text{ final}} = n_{N_2 \text{ entrada}} \quad (45)$$

Tabla 52.

Resultado del balance de materia de Nitrógeno.

Balance del N₂	
Moles alimentadas (mol/h)	1296,09
Moles finales (mol/h)	1296,09

Nota. Para el cálculo se realiza teniendo en cuenta que este compuesto es un inerte dentro de la reacción.

5.4.2.f. Resumen de las corrientes de entrada.

Tabla 53.

Resultado del balance de materia total en la entrada.

	Peso molecular (kg/kmol)	Compuesto	% másico	Flujo másico de entrada kg/h	Flujo molar mol/h	% másica de mezcla	% molar
Biogás	16,04	CH ₄	0,6	1,97	123,05	0,04	0,07
	44,01	CO ₂	0,37	1,22	27,68	0,03	0,02
	34,1	Impurezas	0,03	0,10	**	0,02	**
Aire	28	N ₂	0,79	36,29	1296,10	0,80	0,71
	16	O ₂	21%	5,51	344,53	0,12	0,19
	18	H ₂ O		0,001	23,92	0,003%	1,316%

Nota. La composición másica se realiza teniendo en cuenta que ya se realiza la premezcla entre el aire y el biogás. **Para las impurezas no se encuentra un peso molecular constante, ya que es un parámetro dependiente de las condiciones de cada biodigestor, de modo que solamente se tendrá en cuenta el flujo másico de esta corriente.

5.4.2.g. Resumen de la corriente de gases de la chimenea del horno

Tabla 54.

Resultado de la corriente de gases de salida en el horno.

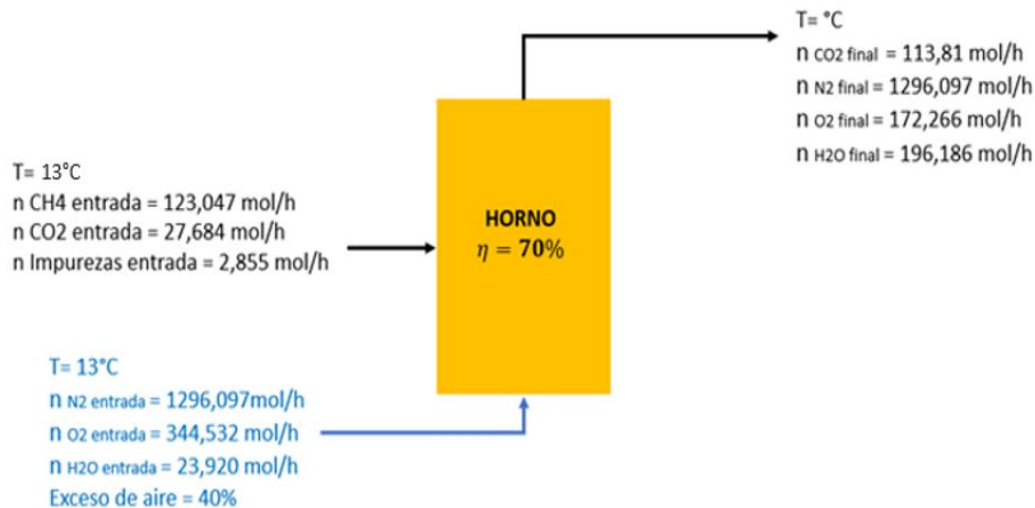
Compuesto	Peso molecular (kg/kmol)	Flujo molar mol/h	Flujo másico kg/h	%másico	% molar
CH ₄	16,04	36,91	0,59	1,21%	2,03%
CO ₂	44,01	113,82	5,01	10,26%	6,27%
H ₂ O	34,1	196,19	6,69	13,70%	10,81%
N ₂	26	1296,10	33,70	68,99%	71,40%
O ₂	16	172,27	2,76	5,64%	9,49%
Impurezas	**	2,86	0,10	0,2%	**
Total	-	1818,13	48,84	1	1

Nota. Para el dato de las impurezas no hay información que pueda proporcionar un valor del peso molecular de los compuestos que lo conforman. **Para las impurezas no se encuentra un peso molecular constante, ya que es un parámetro dependiente de las condiciones de cada biodigestor, de modo que solamente se tendrá en cuenta el flujo másico de esta corriente.

En la figura 36, se puede observar una representación de las corrientes dentro del sistema de combustión.

Figura 36.

Ilustración del balance de materia en el horno de combustión.



Nota. En la figura se muestra los flujos másicos, pero es necesario realizar a partir de esta información, el balance de energía para determinar la temperatura de salida de chimenea en el horno.

5.4.3. Balance de energía en el horno

El cálculo del balance de energía dentro del horno permite determinar la temperatura de los gases de chimenea según las características de la reacción de combustión y la energía liberada por la reacción, así mismo se considera la eficiencia térmica y de combustión en todo el proceso del balance, entre otras variables.[79]

Al cuantificar la temperatura de salida de los gases, se logra determinar la energía que puede llegar a ser aprovechada para otros sistemas como de calefacción o evaporación. En el proyecto los gases de chimenea se dispondrán para calentar el agua destinada para los tanques de las microalgas, al determinar la temperatura y la energía desprendida por medio de la radiación hacia los tanques, se puede lograr establecer la temperatura del agua al entrar en contacto indirecto con estos gases.

Para el balance de energía es importante establecer que la eficiencia térmica en el horno es alta, pues es un sistema de cargas constantes y de operación continua, además este

sistema de combustión está construido a partir de materiales altamente aislantes, generando menor pérdidas de energía entre el medio ambiente y el horno.[77]

Teniendo en cuenta lo anterior, para realizar el balance de materia, inicialmente se establece las constantes para calcular el calor específico de los gases para determinar la variación de la capacidad al incrementar la temperatura, estos valores se observan en la tabla 55 y se determinaron a partir de los datos brindados por la fuente [79].

Tabla 55.

Coefficientes para determinar la capacidad calorífica.

Compuesto	A	B	C	D
CH ₄	34,31	5,47x10 ⁻²	3,66x10 ⁻⁶	-1,10 x10 ⁻⁸
CO ₂	36,11	4,23x10 ⁻²	-2,89 x10 ⁻⁵	7,46 x10 ⁻⁹
H ₂ O	33,46	6,88x10 ⁻³	7,60 x10 ⁻⁶	-3,59 x10 ⁻⁹
N ₂	29	2,20x10 ⁻³	5,72 x10 ⁻⁶	-2,87 x10 ⁻⁹
O ₂	29,1	1,16x10 ⁻²	-6,08 x10 ⁻⁶	1,31 x10 ⁻⁹

Nota. Al no ser un sistema isotérmico, se debe calcular la temperatura de salida de los gases a partir de la variación de la temperatura.

Para el balance de energía se plantea la ecuación 46, que describe sistemas con reacción química.

Ecuación 46

$$Q = \sum \Delta H_{salidas} - \sum \Delta H_{entradas} + \sum \Delta H_{RXN} \quad (46)$$

Como se muestra en la ecuación 46, se tiene en cuenta la energía tanto de la entrada como de la salida al ir variando la temperatura, pero como las entradas de aire y el combustible entran a la misma temperatura, el cambio de entalpia en la entrada sería igual a cero, de manera que la formula queda de la siguiente manera como se muestra en la ecuación 47.

Ecuación 47

$$Q = \sum \Delta H_{salidas} + \sum \Delta H_{RXN} \quad (47)$$

La entalpía de salida se expresa con la ecuación 48, en donde se establece la variación de energía desde a temperatura de entrada la cual es de 13°C y la corriente de la salida de gases de chimenea del horno, la cual se desconoce, y para resolverse es necesario realizar una optimización de acuerdo con la variable objetivo que en este caso es la temperatura teniendo en cuenta el balance global de energía.

Ecuación 48

$$\begin{aligned} \sum \Delta H_{salidas} = & n_{CH_4 \text{ final}} * Cp_{CH_4} * \Delta T + n_{CO_2 \text{ final}} * Cp_{CO_2} * \Delta T \quad (48) \\ & + n_{H_2O \text{ final}} * Cp_{H_2O} * \Delta T + n_{N_2 \text{ final}} * Cp_{N_2} * \Delta T \\ & + n_{O_2 \text{ final}} * Cp_{O_2} * \Delta T \end{aligned}$$

Para determinar la capacidad calorífica de los componentes de salida del horno, se utiliza la ecuación 49, donde la temperatura se expresa en °C y la capacidad calorífica queda en términos de Joule/mol°C

Ecuación 49

$$Cp_i = a + bT_{prom} + cT_{prom}^2 + dT_{prom}^3 \quad (49)$$

Para esta ecuación, la temperatura en la cual se evalúa cada capacidad calorífica se realiza a partir de un valor promedio entre las temperaturas de entrada y salida, inicialmente se asume un valor cualquiera para la temperatura de salida de los gases, debido a que se desconoce, como se muestra en la ecuación 50.

Ecuación 50

$$T_{prom} = \frac{T_{entrada} + T_{chimenea}}{2} \quad (50)$$

La expresión de calor se puede describir con la siguiente ecuación 51.

Ecuación 51

$$Q = \Sigma(n_i \text{ final} * Cp_i) * (T_{Chimenea} - T_{Entrada}) \quad (51)$$

De modo que para calcular la temperatura de los gases de chimenea se realiza teniendo en cuenta los datos de la tabla 56, los cuales fueron calculados anteriormente, exceptuando la energía real, que se halló a partir de la ecuación 52.

Tabla 56.

Características del biogás.

Entalpia de RXN (kJ/kmol)	-803389,4
PM metano (kg/kmol)	16,04
Flujo másico biogás (kg/h)	1,97
Eficiencia térmica	98%
PCI metano kJ/kg	-50086,62
%metano en biogás	0,6
PCI BIOGAS kJ/kg	-30051,97
Energía de combustión (kJ/h)	-59312,87
Energía de combustión (J/h)	-59312871,29
Energía real (J/h)	-58126613,86

Nota. Los valores como la energía de combustión y el PCI del biogás se desarrollaron en el numeral 5.3.

Ecuación 52

$$Energía_{real} = E_{combustión} * \frac{\eta_{termica}}{100\%} \quad (52)$$

Finalmente, la expresión de balance de energía para determinar la temperatura de la salida de humos se expresa de la siguiente manera como se observa en la ecuación 53, en este balance se realiza a partir de la energía real calculada por la ecuación 52, valor que se iguala al cambio de entalpía de salida más la entalpía de reacción, donde finalmente la temperatura de chimenea es la variable objetivo.

Ecuación 53

$$\begin{aligned}
 -58.126.613,86 \text{ J/h} = & \Sigma(n_{i \text{ final}} * C_{p_i}) * (T_{\text{Chimenea}} - T_{\text{Entrada}}) + n_{\text{CH}_4 \text{ final}} * (a + b * \\
 & (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2}) + c * (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2})^2 + d * (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2})^3) + \\
 & n_{\text{CO}_2 \text{ final}} * (a + b * (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2}) + c * (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2})^2 + d * \\
 & (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2})^3) + n_{\text{H}_2\text{O} \text{ final}} * (a + b * (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2}) + c * \\
 & (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2})^2 + d * (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2})^3) + n_{\text{N}_2 \text{ final}} * (a + b * \\
 & (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2}) + c * (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2})^2 + d * (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2})^3) + n_{\text{O}_2 \text{ final}} * \\
 & (a + b * (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2}) + c * (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2})^2 + d * (\frac{T_{\text{Entrada}} + T_{\text{Chimenea}}}{2})^3)
 \end{aligned}
 \tag{53}$$

El resultado de la temperatura de los gases de chimenea es de 957,46°C, con base en esa información se logra plantear el diseño del biorreactor teniendo en cuenta la posibilidad de aprovechamiento de energía emitido por los gases.

6. FOTOBIORREACTOR

Obteniendo como producto de la cámara de combustión dióxido de carbono y agua a una temperatura de 957,47°C, es posible hacer uso de estas dos corrientes que provienen del proceso anterior. En el siguiente capítulo se desarrollará el diseño teórico de un fotobiorreactor para la producción de biomasa del alga conocida como *Spirulina* o *Arthrospira platensis*, el objetivo de obtener este producto es usarlo como alimento para el ganado.

Para la elección del tipo de fotobiorreactor se tomó la decisión de escoger los raceway ponds o estanques de canalización.

La decisión se basó en un estudio [80] donde por medio de una tabla se evalúan las diferentes estructuras en las que se puede cultivar microalgas a gran escala. Para ver esta tabla con mayor detalle remitirse al Anexo I.

En la comparación se puede observar que el sistema de estanques de canalización tiene una evaluación de bueno para el mezclado y la eficiencia de la utilización de la luz. Además, debido a que habrá una inyección de CO₂ con una temperatura alta, se espera que a pesar de que el diseño no permita controlar la temperatura del sistema, la presencia del caudal de CO₂ permita que la temperatura sea lo más cercana posible a la temperatura óptima de organismos mesófilos [81].

El artículo [80] también afirma que el estrés hidrodinámico en las algas es bajo. Sin embargo, la razón principal por la que se escogió este tipo de reactor es la alta productividad de biomasa que este permite. De hecho, actualmente la producción comercial de biomasa para biodiesel o suplementos alimenticios se realiza en este tipo de sistema. Por ejemplo, en las empresas Earthrise, California y Cyanotech, Hawái la producción de *Spirulina Platensis* comercial es la más alta del mundo y se utilizan estanques de canalización [22].

6.1. Ecuación de la biomasa

La ecuación de la biomasa es fundamental para hacer los balances elementales que ocurrirán dentro del sistema.

A pesar de la complejidad que puede ser evaluar cada una de las reacciones ocurridas dentro del fotobiorreactor, el método de la caja negra permite darle una ecuación química a la biomasa del microorganismo a producir.

Esto se logra considerando las sustancias que, en este caso, permiten y fomentan la producción de biomasa y los productos que además de la biomasa como tal son el oxígeno. Son muchos los elementos que hacen parte de estos ciclos metabólicos, sin embargo, solo se tendrán en cuenta aquellos que están en mayor proporción.

En la siguiente tabla se considerará el análisis de la composición elemental del alga *Spirulina platensis* en diferentes artículos.

Tabla 57.*Composición elemental de la Arthrospira platensis según artículo.*

Fuente	C%	H%	N%	O%	S%
Effects of the aqueous phase recycling on bio-oil yield in hydrothermal liquefaction of Spirulina Platensis, α -cellulose, and lignin	46,90	6,90	10,70	35,50	-
Hydrothermal Disintegration and Extraction of different microalgae species	51,00	9,46	13,10	20,30	0,44
Integrating Spirulina platensis cultivation and aerobic composting exhaust for carbon mitigation and biomass production	43,50	6,31	8,97	40,42	0,80
Multi-response optimization of bio-oil production from catalytic solar pyrolysis of Spirulina platensis	41,68	6,36	9,64	33,73	1,42
Synergistic bio-oil production from hydrothermal co-liquefaction of Spirulina platensis and α -Cellulose	46,90	6,90	10,70	35,50	-

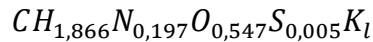
Nota. Cada valor fue otorgado por diferentes artículos por lo que fue necesario promediarlos.

Tomando como base de cálculo que en la ecuación de la biomasa el carbono es 1, se determina el valor de los otros compuestos teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

Ecuación 54.



Así que, teniendo en cuenta los respectivos pesos moleculares de los elementos considerados, se determinó que la fórmula de la biomasa sería:

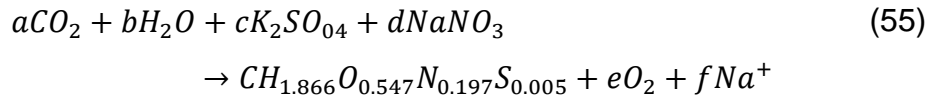


Debido a la ausencia de información sobre la composición del potasio, se determina el coeficiente que lo acompaña al hacer el balance estequiométrico de la reacción metabólica de la Spirulina.

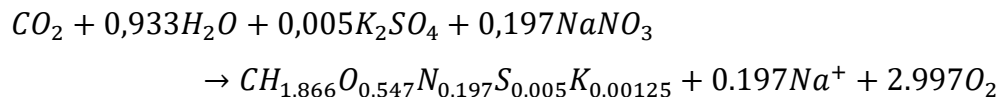
La reacción tiene en cuenta el CO₂ como fuente de carbono para el microorganismo, también es necesaria una fuente de azufre, potasio y agua.

Por eso, la ecuación sin balancear queda de la forma:

Ecuación 55.



La ecuación inicia con una base de cálculo que establece que el número que acompaña a la ecuación de la biomasa es uno. De esta forma, la ecuación balanceada queda:



6.2. Funcionamiento del fotobiorreactor

Se busca que el fotobiorreactor no sea batch debido a que esto implicaría que el microorganismo cada vez que se inicia el reactor atravesara la fase de latencia que implica un crecimiento lento del microorganismo.

Por lo tanto, la operación del tanque será de la siguiente manera.

Inicialmente, se considera como condición inicial, que el tanque tenga una concentración de 80 gramos de materia seca de Spirulina por metro cuadrado. De esta forma, la

Spirulina se encontrará en la fase exponencial de crecimiento al estar adaptada al medio y al tener suficiente agua y nutrientes para crecer. Posteriormente, después de 4 días, se diseñará un fotobiorreactor que sea desocupado hasta cierto nivel, luego se rellenará con agua y los nutrientes necesarios y, finalmente, el proceso volverá a iniciar siempre con la misma concentración de Spirulina.

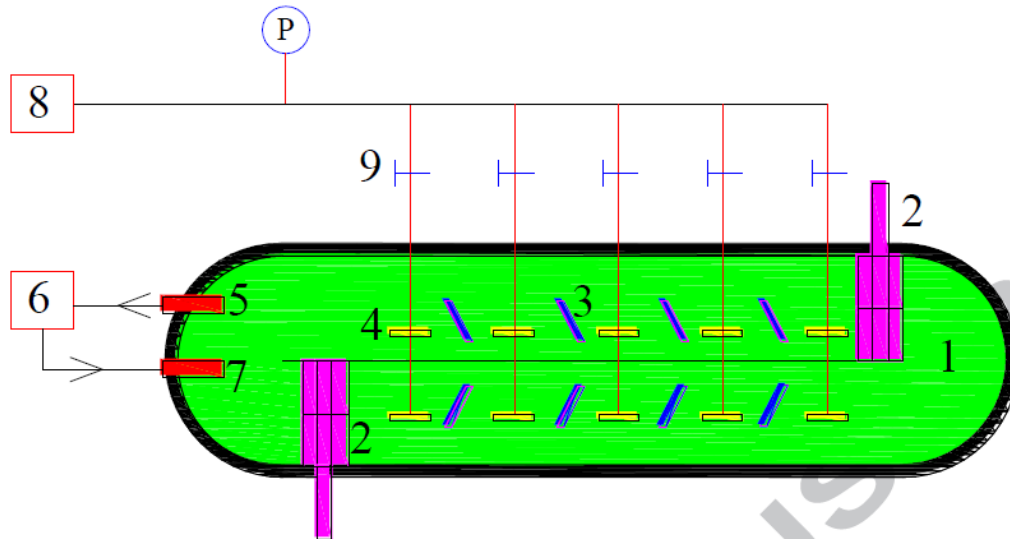
Serán 4 días ya que la concentración de Spirulina debe mantenerse menor a 140 g MS/m², [82] será necesario desocupar el tanque hasta que llegue a un 57,43% de capacidad (Ver Anexo II).

De esta forma, al volverlo a llenar con agua y nutrientes hasta su capacidad inicial, volverá a tener una concentración de 80 g MS/m². La razón por la que no debe superar la concentración mencionada con anterioridad es el término de la fase de crecimiento exponencial de las microalgas. Más allá de este valor la cantidad de nutrientes no es la suficiente para que continúe un crecimiento rápido en el tanque.[83]

El diseño del tanque será de la siguiente forma:

Figura 37.

Diagrama de distribución de accesorios del tanque de canalización.



Nota. El diagrama muestra las diferentes partes y equipos necesarios para el funcionamiento del tanque de canalización. Tomado de: J. Cheng, W. Guo, K. Ameer Ali, Q. Ye, G. Jin, and Z. Qiao, "Promoting helix pitch and trichome length to improve biomass harvesting efficiency and carbon dioxide fixation rate by *Spirulina* sp. in 660 m² raceway ponds under purified carbon dioxide from a coal chemical flue gas," *Bioresour. Technol.*, vol. 261, pp. 76–85, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.04.017.

La anterior figura se basa en el artículo publicado en Elsevier [84], en el que se diseñó un tanque de canalización de 660 m². Como se puede observar, junto al número dos se representa un molino que permite que la velocidad del fluido sea de 0,305 m/s. Sin embargo, para lograr esta velocidad teniendo un tanque de esta área, se necesitan dos molinos.

Debido a que el tanque del presente trabajo será de 300 m², se utilizará únicamente un molino para alcanzar la turbulencia deseada. El molino trabajará de 7 am a 10 pm.

La figura 37 se basa en el artículo publicado en Elsevier [84], en el que se diseñó un tanque de canalización de 660 m². Como se puede observar, junto al número dos se representa un molino que permite que la velocidad del fluido sea de 0,305 m/s. Sin

embargo, para lograr esta velocidad teniendo un tanque de esta área, se necesitan dos molinos.

La agitación es necesaria en este modelo, no solo para hacer que la mezcla sea homogénea, sino que un régimen turbulento fomenta el crecimiento de las microalgas. Este y la luz son dos parámetros significativos para el crecimiento de la Spirulina [85]. Por lo tanto, se confirma que se tendrá en cuenta un molino que asegure que la velocidad sea de 30,5 cm/s

En la figura 36 también se observan de color violeta y junto al número 3, numerosos deflectores que promueven la turbulencia del sistema. Estos estarán ubicados a lo largo del tanque, serán 4 en total y tendrán una altura de 15 cm.

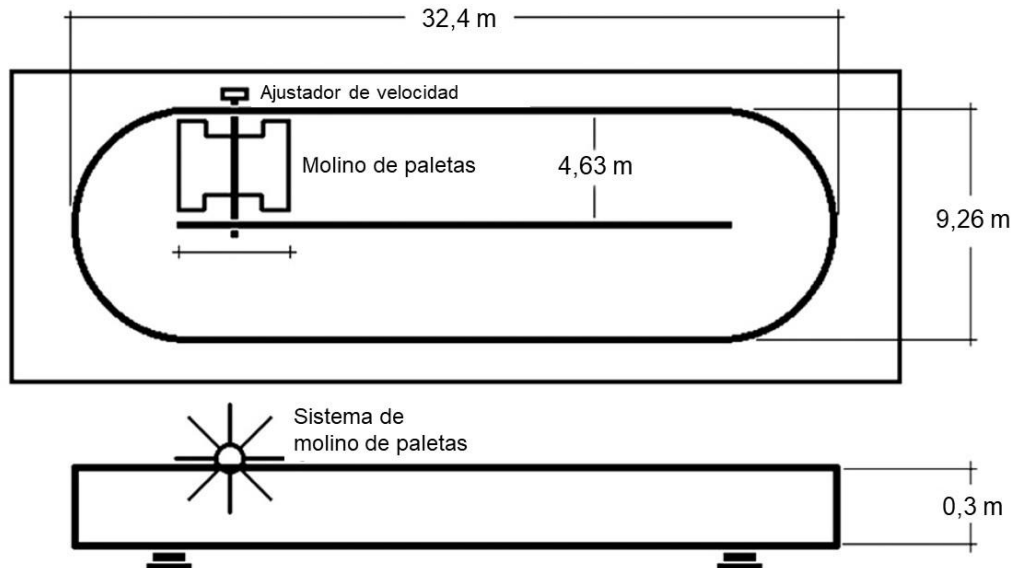
De igual forma, hay que tener en cuenta la inyección de CO₂ dentro del tanque. El objetivo es que sea introducido a un flujo de 30 L de CO₂/min a través de una tubería que consta de un diámetro interno de 1 cm y cuyos puntos de salida estén distribuidos a lo largo de la tubería. Estos orificios deben tener un diámetro de 1mm para asegurar un tamaño de burbuja que fomente la dilución del CO₂ en el agua. Se puede observar de color amarillo y junto al número 4 de la figura 36 la disposición espacial de la tubería para la inyección de CO₂.

Respecto a las dimensiones del tanque, este tiene una forma de prisma rectangular.

El ancho de un canal es de 4,63 metros y al tener un recorrido circular, el ancho es de 9,26 metros. La relación ancho largo está dada por una heurística que determina que por cada dos metros de ancho se deben hacer 7 metros de largo. Por lo tanto, el largo del tanque es de 32,4 metros. Estas dimensiones se pueden observar en la siguiente figura 28.

Figura 38.

Diagrama de dimensiones del tanque de canalización.



Nota. El molino de paletas debe ser del ancho de cada canal. El tanque puede ser ubicado a la altura del suelo o por encima de este.

Respecto a la altura del tanque, en diferentes fuentes se utiliza siempre una altura de 30 centímetros. Esto debido a que se ha demostrado que una altura mayor no aportará al crecimiento de la microalga pues en 30 centímetros se espera que la Spirulina ya haya entrado en contacto con la fuente de carbono. [84], [86]

6.3. Premisas de diseño (condiciones ambientales)

6.3.1. Temperatura

Considerando que la temperatura ambiente es de 13 °C y que se asume que la temperatura del tanque de canalización es de 23,8 °C, es necesario que ingrese una corriente con una temperatura mayor al sistema. Es por esto por lo que el agua que ingresa cada 4 días tendrá una temperatura inicial de 37°C. Esto sumado a la temperatura a la que ingresa la corriente de CO₂ inyectado, se espera fomente el crecimiento de la Spirulina considerando que su temperatura debería encontrarse entre los 25 y 35°C. [87]

6.3.2. Presión

Al ser un tanque abierto el proceso se realizará a presión atmosférica, por lo que no estará sometida a condiciones extremas de presión y, por ende, no afectará su tasa de crecimiento [88].

6.3.3. pH

Por otro lado, se considera un pH inicial de 10,3. Esto debido a la consideración de que el pH debe encontrarse entre 8,5 y 10,5, además que la fijación del CO₂ considerada en el presente trabajo tiene un pH de este valor. Sin embargo, puede variar 0,2 décimas debido a que la presencia de la Spirulina puede afectar el pH del sistema siendo la concentración de Spirulina proporcional al pH. [87]

6.3.4. Concentración inicial de la biomasa

Debido a que el crecimiento de la biomasa no puede empezar en valor pequeños buscando evitar la fase de latencia de la curva de crecimiento de la Spirulina. Se estableció que la concentración inicial será de 80 gramos de masa seca de Spirulina por metro cuadrado.

6.3.5. Densidad

Fue necesario determinar la densidad de la Spirulina para poder determinar cuánto volumen ocupa cierta masa de la especie. Esto debido a que, para tener una visión global del sistema, es obstructivo utilizar la densidad en unidades por volumen ya que cada unidad puede tener tamaños diferentes tanto de longitud como de grosor.

La determinación de la densidad se hizo teniendo en cuenta la siguiente ecuación.

Ecuación 56

$$\rho_S = \rho_{MS} * \%MS + \rho_{H_2O} * \%HUMEDAD \quad (56)$$

Siendo MS la masa seca de la Spirulina, se realiza un promedio ponderado de lo que es masa seca y contenido de agua.

Según la bibliografía, la masa seca de Spirulina tiene una densidad de 0,5 gramos por centímetro cúbico [89]. El porcentaje de humedad en estos microorganismos es del 90% [90], por lo tanto, se infiere que el resto del porcentaje es materia seca.

De esta forma, la densidad de la Spirulina tendría un valor de 948,22 kg/m³.

6.3.6. Turbulencia

Para calcular la turbulencia fue necesario primero determinar el diámetro equivalente del canal. Esto debido a que no es circular y para hallar el Reynolds es necesario tener este valor. El diámetro equivalente fue calculado con la siguiente ecuación:

Ecuación 57.

$$D_{eq} = 2 * \sqrt{\frac{4,63m * 0,3m}{\pi}} = 1,33m \quad (57)$$

Considerando que los valores dentro de la raíz son aquellos mencionados con anterioridad respecto a las dimensiones del canal.

Como fue mencionado, la velocidad con la que fluye el agua y la biomasa por el canal debe ser de 30,5 cm/s y ya que la mayor cantidad es agua (más del 99% como se verá más adelante), se tiene en cuenta su viscosidad de 1,004E-4 m²/s.

De esta forma, se calcula el Reynolds del fluido.

Ecuación 58.

$$Re = \frac{v * D_{eq}}{\vartheta} = \frac{0,305 \frac{m}{s} * 1,33m}{1,004 \times 10^{-4} \frac{m^2}{s}} = 4039,52 \quad (58)$$

Teniendo en cuenta que este Reynolds es para una tubería y por eso se utilizará el diámetro equivalente y no el área transversal del canal.

Como se puede observar, el Reynolds es mayor a 4000, por lo tanto, se considera que es un flujo con un régimen turbulento.

6.4. Balance de materia

6.4.1. Fijación de dióxido de carbono

Considerando las premisas mencionadas con anterioridad, en el artículo publicado en la revista Bioresource Technology, [84] se calculó una cantidad de dióxido de carbono fijado de 25,5 gramos de CO₂ por metro cuadrado al día.

Asumiendo que la fijación de este carbono se debe a la transformación de este en biomasa, es posible realizar el balance de energía con la reacción. De esta forma, por cada mol de dióxido de carbono fijado, se espera se produzca un mol de biomasa.

Sin embargo, teniendo como limitante la concentración de Spirulina en el tanque de canalización, es necesario desocupar el tanque al cuarto día. Justo cuando la concentración de biomasa se estima sea de 139,18 gramos de biomasa seca por metro cuadrado.

Por lo tanto, es necesario que la capacidad del tanque quede al 57,48%, es decir se retira un volumen de agua y Spirulina del 38,35 m³. Al momento de retirar lo anteriormente mencionado, por otra entrada entra agua y los nutrientes necesarios. Para esto es necesario tener en cuenta el medio cultivo.

6.4.2. Nutrientes

En el balance de masa es necesario tener en cuenta cuánto hay que suplir de nutrientes. Para esto se tiene en cuenta el medio de cultivo de Zarrouk. [91]

Tabla 58.

Especificaciones del medio de Zarrouk.

Compuestos	Cantidad (g/L)
NaCl	1
MgSO ₄ *7H ₂ O	0,2
CaCl ₂	0,04
FeSO ₄ *7H ₂ O	0,01
EDTA	0,08
NaNO ₃	2,5
K ₂ HPO ₄	0,5
K ₂ SO ₄	1

Nota. El medio de Zarrouk se usa típicamente para el crecimiento de *Spirulina platensis*. Tomado de: S. Gunes, S. Tamburaci, M. C. Dalay, and I. D. Gurhan, "In vitro evaluation of *Spirulina platensis* extract incorporated skin cream with its wound healing and antioxidant activities," *Pharm. Biol.*, vol. 55, no. 1, pp. 1824–1832, 2017, doi: 10.1080/13880209.2017.1331249.

Teniendo en cuenta que estas son cantidades por litro y que deben ingresar 38,35 m de agua. Se espera que las cantidades del medio de cultivo de Zarrouk a ingresar en cada tanda es la siguiente tabla 59.

Tabla 59.

Cantidades de los ingredientes del medio de Zarrouk a ingresar cada cuatro días.

Ingredientes	Cantidad en todo el tanque (kg)
NaCl	51,65
MgSO ₄ *7H ₂ O	10,33
CaCl ₂	2,07
FeSO ₄ *7H ₂ O	0,52
EDTA	4,13
NaNO ₃	129,11
K ₂ HPO ₄	25,82
K ₂ SO ₄	51,65

Nota. Estos valores son diferentes si apenas se está inicializando el proceso.

6.4.3. Inyección de dióxido de carbono

Considerando el artículo de donde se obtuvo la fijación de dióxido de carbono, estos tuvieron en cuenta un flujo de entrada de este compuesto de 30 litros de CO₂ /min altamente purificado.

Para observar si los valores del artículo son comparables es necesario calcular el flujo volumétrico de dióxido de carbono que llega al tanque de canalización. Teniendo en cuenta la información sobre la corriente que sale de la cámara de combustión, se realiza el siguiente cálculo:

Ecuación 59.

$$CO_2 \left[\frac{L}{h} \right] = F_{CO_2} \left[\frac{kg}{h} \right] * \frac{1}{\rho_{CO_2} \left[\frac{kg}{m^3} \right]} * \frac{1000L}{1m^3} * \frac{1 h}{60 min} \quad (59)$$

$$CO_2 \left[\frac{L}{h} \right] = 3,79 \left[\frac{kg}{h} \right] * \frac{1}{1,98 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} * \frac{1000L}{1m^3} * \frac{1 h}{60 min} = 31,97 \frac{L CO_2}{min}$$

Como se observa, la inyección de dióxido de carbono será muy similar en comparación con el artículo mencionado con anterioridad.

A pesar de que el flujo que será inyectado al tanque de canalización no es de alta pureza de CO₂, deberá tenerse en cuenta unos tubos con mayor longitud para que la velocidad y presión con la que es inyectado el flujo de gases de combustión no impida que el CO₂ se solubilizase en el agua y entre en contacto con las microalgas.

6.4.4. Flujo de salida de biomasa

Para tener información detallada sobre el cálculo del balance de materia del tanque de canalización remitirse al Anexo II.

En esta hoja de cálculo se puede observar la composición de salida del tanque de canalización. Al retirar un porcentaje del tanque este será un 99,5% agua en peso y el resto sería Spirulina.

Para calcular el peso seco de la microalga en el flujo de salida se realizaron los siguientes cálculos:

Ecuación 60.

$$M_{Sp} \left[\frac{kg MS}{lote} \right] = (M_{t=4 \text{ días}} - M_{retirado}) * 0.5\% * 10\% \quad (60)$$

$$M_{Sp} = 17,79 \left[\frac{kg MS}{lote} \right]$$

La masa de Spirulina se calcula utilizando la masa del tanque a los 4 días menos la masa de agua+ Spirulina retirada. Se multiplica por 0,5% ya que es la fracción másica de Spirulina y por el 10% que es la cantidad de masa seca que hay por Spirulina.

Esta corriente de agua y Spirulina tiene un peso seco de la microalga de 17,79 kg MS por lote. Sin embargo, para el consumo de Spirulina no es necesario retirar toda el agua que hace parte de esta.

6.4.5. Balance molar de la reacción de producción de biomasa

Teniendo en cuenta la ecuación 60 donde se observa la ecuación de producción de la biomasa. Se hace un balance molar cuyos resultados son los siguientes:

Tabla 60.

Balance molar reacción producción biomasa.

Reactivos	Cantidad consumida (mol)	Cantidad consumida (gramos)
CO ₂	6952,97	305930,47
H ₂ O	6487,12	116768,10
K ₂ SO ₄	34,76	6049,08
NaNO ₃	1369,73	116427,40
Productos	Cantidad producida (mol)	Cantidad producida (gramos)
Biomasa	6952,97	177889,88
Na+	1369,73	31503,89
O ₂	20838,04	666817,18

Nota. Los reactivos son todos los nutrientes, la fuente de carbono, nitrógeno y agua. Sin embargo, se tienen en cuenta los que tienen valores significantes.

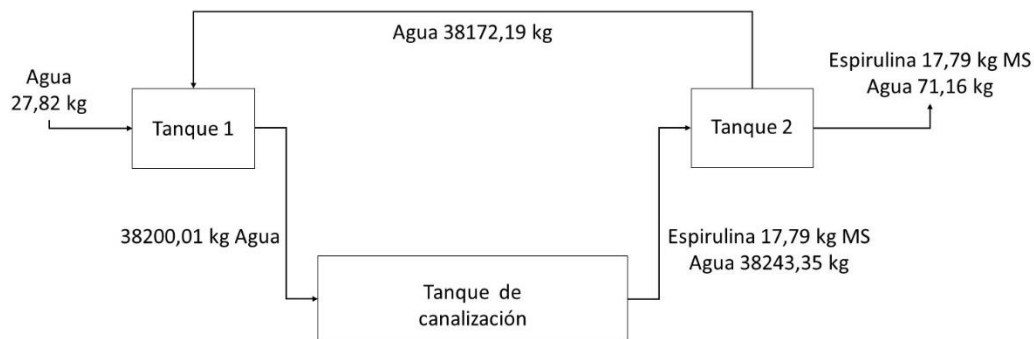
Haciendo una comparación con el flujo inyectado de dióxido de carbono en los tanques de canalización y la cantidad de carbono fijado, se puede estimar que la eficiencia de fijación de carbono se encuentra alrededor de los 63%.

6.4.6. Agua

Teniendo en cuenta los cálculos expuestos en el Anexo II, es necesario conocer la cantidad de agua que circula a lo largo del sistema. Teniendo en cuenta la cantidad que se recupera en la extracción manual que se explicará más adelante, el flujo de agua se vería de la forma:

Figura 39.

Flujo de agua a lo largo del sistema del fotobiorreactor.



Nota. El flujo representa la cantidad de agua que circula por el sistema durante los 4 días que demora cada lote.

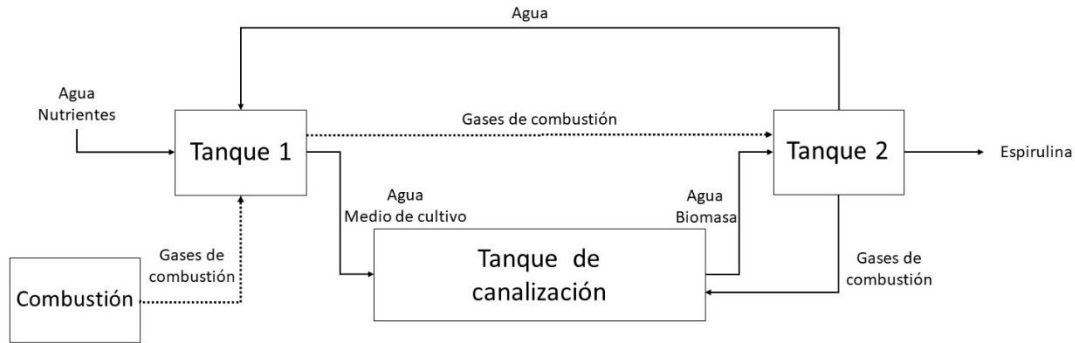
Como se puede observar la mayoría del agua se recircula por lo que se puede afirmar que es totalmente aprovechable pues el agua que sale junto con la Spirulina es consumida por las vacas. Por lo tanto, el agua que hay que suplir no necesariamente es un costo adicional.

6.5. Balance de energía

Para conocer cómo es el balance de energía en el tanque de canalización, es necesario conocer las corrientes previas y posteriores al sistema.

Figura 40.

Diagrama de flujos másicos y energéticos posteriores a la cámara de combustión.



Nota. Las líneas continuas representan flujos másicos y las líneas punteadas representan flujos energéticos.

Cuando el tanque de canalización cumpla los 4 días propuestos, el agua y la biomasa que se retiran entrarán al tanque 2. Posterior a esto, se le dará paso a el agua y nutrientes que se encuentran en el tanque 1 para que inicie el crecimiento de biomasa otra vez.

Como se puede observar en la figura 40, se busca aprovechar toda la energía obtenida en la combustión del biogás. Es por esto que los gases de combustión aportarán energía para que el agua del tanque 1 llegue a los 37 °C. Sin ingresa a una temperatura mayor podría afectar negativamente a las microalgas que se encuentren en el tanque. Sin embargo, el flujo y temperatura de estos gases de combustión es tan alto que alcanza la energía para aportar calor a la biomasa que llega al tanque 2.

Considerando que los gases de combustión salen a una temperatura de 957,47°C se realiza el balance de calor para calentar 397,92 kg de agua por hora, lo que corresponde a el agua que se debe alimentar al tanque de canalización cada 4 días. Para esto se necesita 39880,82 kJ/h de energía que debe ser transferido de los gases de combustión al agua del tanque 1. Teniendo esto en cuenta la temperatura de los gases de combustión sería de 306,70 °C después de transferir esta cantidad de energía.

La energía mencionada se calculó con la siguiente ecuación:

Ecuación 61

$$Q = F * Cp(T) * \Delta T = 397,92 \left[\frac{kg}{h} \right] * 4,176 \left[\frac{kJ}{kg * K} \right] * (37 - 13)K \quad (61)$$

Siendo F la cantidad de agua a calentar en los 4 días previos al llenado del fotobiorreactor, Cp la capacidad calorífica del agua a la temperatura promedio entre 37°C y 13°C. Y siendo delta de T la diferencia entre la temperatura final a la que se busca llevar el agua (37°C) y la temperatura inicial que se considera (13°C).

De igual forma, la disminución de la temperatura de los gases se determinó con la siguiente expresión:

Ecuación 62

$$Q = F * \sum_i Cp(T) * x_i * \Delta T = 39.880,82 \left[\frac{kJ}{h} \right] \quad (62)$$

En este caso se iguala el calor al resultado en la ecuación 61. Siendo F el flujo de gases de chimenea y en la sumatoria se determina la capacidad calorífica con la temperatura promedio de la mezcla con un promedio ponderado, siendo i cada compuesto. Finalmente, se itera el valor de la temperatura final y este da un resultado de 306,70°C.

Para bajar aún más la temperatura de este flujo de gas es necesario refrigerarlo con el agua más biomasa que se tiene en el tanque 2. Sin embargo, asumiendo una transferencia de calor continua y buscando que el flujo de gases de combustión tenga una temperatura de 37°C, el calor transferido permite que la temperatura del tanque 2 suba de 13°C (asumiendo la temperatura mínima a la que estará el sistema) a 21,87°C.

Es necesario considerar también que, dentro del fotobiorreactor, hay una transferencia de energía constante gracias a el CO₂ inyectado a 37°C. Por eso, se ha considerado que la temperatura de trabajo es de 23,8°C. A pesar de esto, se espera que el perfil de temperatura sea mayor el día 1 y menos el día 4.

6.6. Postratamiento

Es necesario mencionar que diferentes fuentes mencionan la necesidad de poner a la salida del tanque de canalización un filtro de 0,3 mm que impida el paso de insectos, ramas, entre otros.[92],[93],[84]

Al tener una biomasa cuyo porcentaje en peso es tan bajo, es necesario que sea sometido a tratamiento que aumenten su pureza.

Sin embargo, es necesario tener cuidado con el método escogido pues un tratamiento con temperaturas altas por un tiempo largo puede afectar nutrientes que caracterizan a la Spirulina como antioxidantes, ácidos grasos esenciales, vitaminas, entre otros.[94]

Según el artículo de la revista Animal Production Science [95] se pueden ver efectos positivos en la ingesta de Spirulina por parte de rumiantes desde el 1% en peso.

Según el artículo de JP Jordan [92] es posible obtener hasta un porcentaje del 20% por medio de dos etapas.

La primera etapa de filtración se realiza por gravedad y haciendo uso de una malla sintética que puede ser de poliéster, con una apertura de 40 μm . Para acelerar este proceso se puede realizar movimientos con la malla y se termina obteniendo lo que parece una torta de filtración que puede ser más fácil de manipular. Con esta primera etapa se puede conseguir hasta un 10% de materia seca de biomasa en peso.

La segunda etapa utiliza presión para poder eliminar una mayor cantidad de agua. La torta obtenida en la filtración anterior se ubica en una malla (que puede ser la misma anterior y se le puede añadir una tela fuerte de algodón). Esto se puede realizar en una prensa o un lagar y es necesario aplicar una presión de 0,2 kg por cm^2 por 15 minutos como mínimo.

Si tenemos en cuenta esta eliminación de agua tendríamos cada 4 días como producto final una mezcla de Spirulina y agua de la siguiente proporción y cantidad.

Tabla 61.

Cantidad y porcentaje de Spirulina obtenida en cada lote.

Componente	Cantidad (kg)	%
Materia seca Spirulina	17,79	25%
Agua	53,37	75%
Total	71,16	100%

Nota. La materia seca de Spirulina no tiene en cuenta el porcentaje de humedad normal que usualmente la acompaña.

Se recomienda que, si no va a ser utilizada la Spirulina de forma inmediata, esta se almacene en recipientes herméticos para impedir su fermentación o contaminación con otros microorganismos.

6.7. Requerimientos especiales

Diferentes fuentes mencionan como recomendación cubrir el tanque de canalización en las noches con plástico. De esta forma, se evita contaminación durante estas horas o que algún animal se adentre en el tanque.[93]

De igual forma, es necesario tener cuidado con las paletas escogidas para la agitación. El diseño que se escoge con preferencia es el de paleta plana pues no se está trabajando con un fluido viscoso. Además, es necesario tener cuidado con la fuerza de cizalla ejercida sobre la microalga. [84]

Respecto a la luz, se tuvo en consideración el poner diferentes fuentes de luz durante la noche para que el crecimiento fuera mayor. Sin embargo, es durante el ciclo de Calvin que las microalgas producen estructuras necesarias como las proteínas. Por lo que no se puede hacer que estas estén todo el tiempo en fase lumínica [96]. Sin embargo, la opción óptima fue cuando se sometió a 18 horas de luz y 6 de oscuridad, por lo que valdría la pena estudiar si financieramente es viable considerar esta opción.

6.8. Beneficios de la Spirulina en dietas de rumiantes

En un estudio realizado por se comenta la utilización de Spirulina en el agua que beben los bovinos para fomentar el aumento de la cantidad de microorganismos en el rumen y, por ende, subir la digestibilidad de los alimentos de estas. Es importante esta característica pues, a mayor digestibilidad menor cantidad de alimento es necesaria.[95]

Además, al ser alimentadas con Spirulina cuya cantidad de lípidos sea alta y baja en fibra, se ha comprobado, disminuye las emisiones de metano causadas por la digestión de celulosa.

De igual manera, la composición nutricional es comparable con la de la soya (alimento que se usa típicamente para la alimentación de ganado). Por ejemplo, los niveles de fibras son significativamente mayores. Respecto a la proteína, se puede encontrar que el grano de soya tiene 396 gramos por kilogramo de materia seca y la Spirulina puede tener 692 g de proteína por kilogramos de materia seca, siendo una importante fuente de proteína para los rumiantes. [97]

Por otro lado, la presencia de al menos 20% de Spirulina en la dieta de rumiantes, disminuye el tiempo de retención en el rumen. Además, las vacas con consumo de Spirulina son entre un 8,5% y un 11% más gordas que el grupo control. También, producen una mayor cantidad de leche con un contenido mayor de grasa, proteína y lactosa. Incluso, la cantidad de ácidos grasos saturados disminuyó, mientras que los ácidos grasos mono y polinsaturados aumentaron.[98]

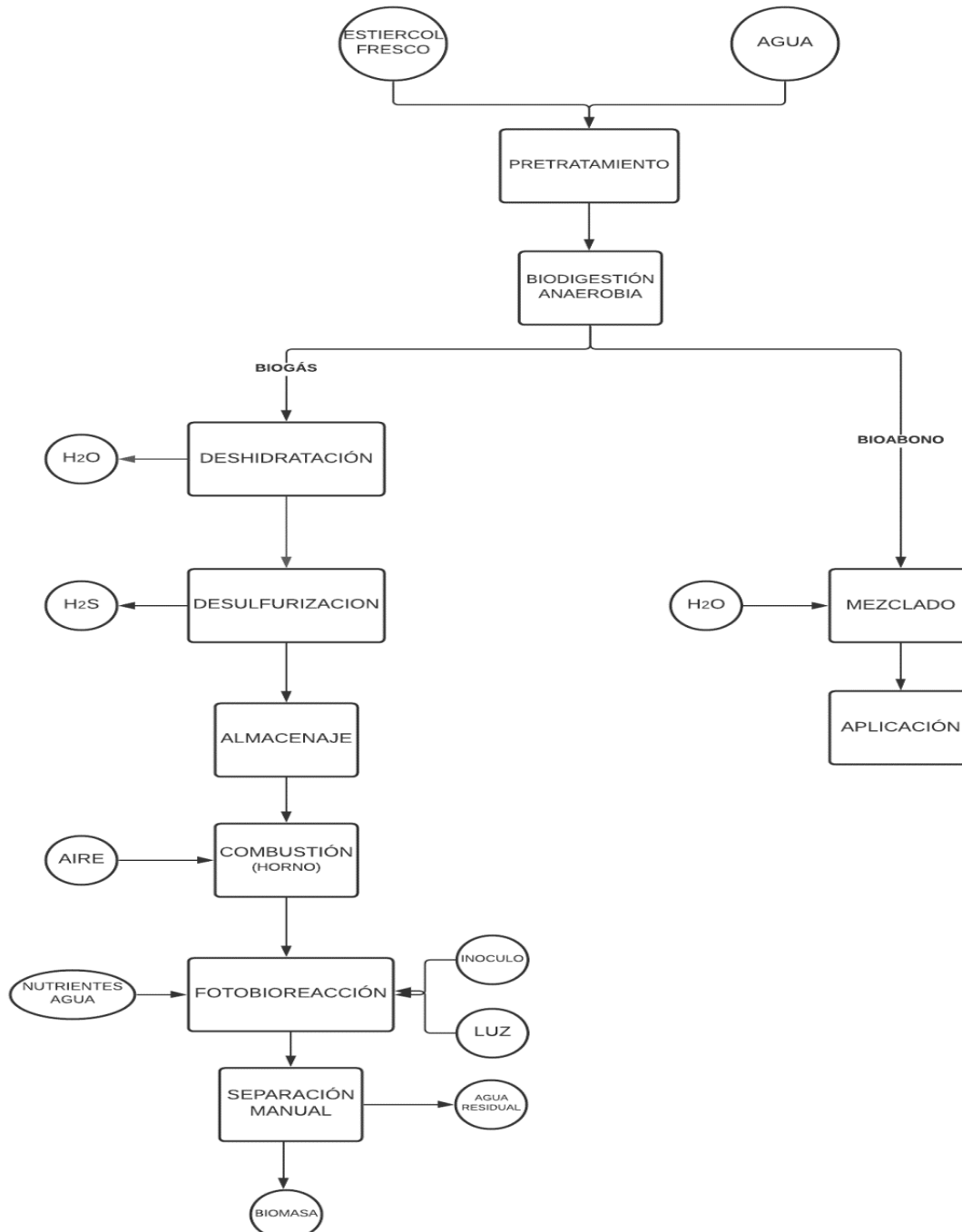
7. COSTOS DE EJECUCIÓN

Plantear o estimar los costos de ejecución de diseño permiten dar un panorama de factibilidad desde un punto económico, teniendo en cuenta supuestos y estimaciones que deben ser de alto grado de confiabilidad, es decir que los costos de los equipos, la mano de obra, accesorios, bombas, entre otros, deben ser actualizados, de igual manera desarrollar este estudio genera menor incertidumbre sobre si el proyecto pudiese ser un éxito o fracaso dentro de alguna inversión. [99]

A partir del diseño teórico de todo el sistema autosustentable como se muestra en la figura 41, se puede llegar a realizar la estimación del costo de ejecución con base a las condiciones de construcción de los equipos del proyecto. Al elaborar los costos también se logra detectar cualquier equipo innecesario. Uno de los aspectos importantes es determinar un plazo determinado para los costos, por lo cual se seleccionó un plazo anual.

Figura 41.

Diagrama de flujo en bloques del diseño propuesto.



Nota. Diagrama de bloques con los materiales a necesitar, los procesos a los que fueron sometidos y los productos obtenidos.

Para empezar a desarrollar los costos de ejecución (costo de inversión), inicialmente se realiza el presupuesto de inversión, es decir, el costo total de producción de todos los bienes y servicios que se analizan desde la sumatoria de los costos fijos anuales (CF) y los costos variables (CV) donde se debe analizar los siguientes puntos.

7.1. Costos directos

En ese punto se determina el costo del planeamiento, la ejecución y el mantenimiento durante el año, así mismo se tiene en cuenta los gastos de mano de obra, materiales, equipos necesarios, costos de construcción, estos valores son invariables con relación al objetivo de la planta.

En la Tabla 62, se puede observar los costos directos asociados a la construcción de todo el proceso, las fuentes en donde fueron determinados los precios a partir de precios que se encontraron en algunas páginas web y otras fueron por cotizaciones por parte de ingenieros civiles, adicionalmente allí mismo se encuentra las cotizaciones del montaje de algunos sistemas del proceso.

Tabla 62.*Planteamiento de los costos fijos.*

Sistema de diseño	Costo de inversión			
	Gastos Fijos	Monto	Can	Total
Mano de obra del biodigestor	Limpieza del terreno	\$ 12.341.447,37	1	\$ 12.341.447,37
	Excavación del terreno			
	Instalación			
	Transporte del material			
Conducción de biogás	Tuberías de biogás en PVC de 1/2" (m)	\$ 27.900,00	17	\$ 474.300,00
	Codos en PVC	\$ 1.400,00	7	\$ 9.800,00
	Llaves de bola de 1/2"	\$ 17.560,00	2	\$ 35.120,00
	Niples de PVC de 1/2"	\$ 3.400,00	5	\$ 17.000,00
	Filtro de ácido sulfhídrico	\$ 285.000,00	1	\$ 285.000,00
	Tanque de almacenamiento de biogás	\$ 1.803.750,00	1	\$ 1.803.750,00

Tabla 62. Continuación

Montaje Biodigestor	Tubería de PVC de 6" (m)	\$ 4.950,00	15	\$ 74.250,00
	Tanque 6-7m ³	\$ 3.607.500,00	1	\$ 3.607.500,00
	plástico aislante para la zanja	\$ 57.500,00	2	\$ 115.000,00
	Biodigestor L=20m y D=4m 260 M ²	\$ 3.470.415,00	1	\$ 3.470.415,00
	Válvula De Alivio De Temperatura Y Presión De 1/2	\$ 119.900,00	1	\$ 119.900,00
Costo total Biodigestor				\$ 22.353.482,37
Mano de obra en el horno	Limpieza del horno	\$ 200.000,00	1	\$ 200.000,00
	Preparación del horno			
	Instalación			
Montaje Horno	Ladrillo refractario	\$ 300.000,00	1	\$ 300.000,00
	Horno modelo ES 1029-55 Alto: 87cm D=73cm			
	Fibra refractaria			
	Válvula de paso			
	Válvula del cilindro			
	Regulador			

Tabla 62. Continuación

	Quemador tipo Venturi			
	Tubos metálicos 21 cm			
	Codos metálicos 1/2"			
Costo total Horno				\$ 500.000,00
Mano de obra en el fotobiorreactor	Limpieza			
	Ensamble y verificación	\$ 5.021.640,00	1	\$ 5.021.640,00
	Instalación			
Montaje del Fotobiorreactor Raceway	Concreto pobre m2	\$ 22.000,00	288	\$ 6.336.000,00
	Placa de contrapiso en mortero impermeabilizado m ³	\$ 490.000,00	34,56	\$ 16.934.400,00
	Cultivo de Spirulina	\$ 87.718,00	1	\$ 87.718,00
	Muro de concreto impermeabilizado E=12 cm 1m ³	\$ 500.000,00	2,952	\$ 1.476.000,00
	Malla electrosoldada 4mm UND	\$ 131.000,00	21	\$ 2.751.000,00
	Compresor de CO ₂	\$ 549.000,00	1	\$ 549.000,00

Tabla 62. Continuación

	Material de protección de la superficie	\$ 8.800,00	50	\$ 440.000,00
	Malla de poliéster 136cm	\$ 14.430,00	5	\$ 72.150,00
	Molino de paletas =4,63m 30cm/s	\$ 3.700.000,00	1	\$ 3.700.000,00
Montaje del tanque de agua	Concreto pobre m ²	\$ 22.000,00	144	\$ 3.168.000,00
	Placa de contrapiso en mortero impermeabilizado m ³	\$ 490.000,00	18	\$ 8.820.000,00
	Muro de concreto impermeabilizado E=12cm m ³	\$ 500.000,00	1,476	\$ 738.000,00
	Malla electrosoldada 4mm UND	\$ 131.000,00	11	\$ 1.441.000,00
Costo total Fotobiorreactor				\$ 51.534.908,00
Mantenimientos	Biodigestor	\$ 1.143.577,50	1	\$ 1.143.577,50
	Cambio Filtros de ácido sulfhídrico	\$ 285.000,00	1	\$ 285.000,00
	Horno	\$ 40.000,00	1	\$ 40.000,00
	Sistemas de inyección	\$ 90.000,00	1	\$ 90.000,00

Tabla 62. Continuación

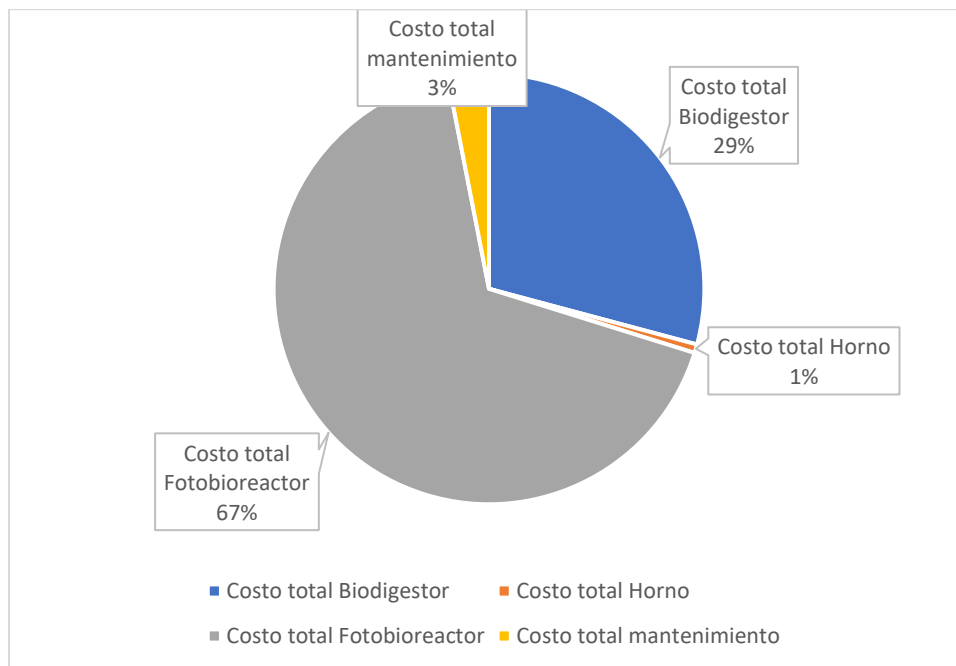
	Tanque de almacenamiento de agua con tuberías	\$ 300.000,00	1	\$ 300.000,00
	Tanque Raceway con tuberías	\$ 500.000,00	1	\$ 500.000,00
Costo total por mantenimiento				\$ 2.358.577,50
Total				\$76.746.967,87

Nota. Toda la información fue sustentada bibliográficamente, en los anexos III y IV se encuentra toda la información necesaria.

De acuerdo con los costos totales fijos de cada parte que componen el valor de inversión para la construcción del proceso autosustentable, en la figura 42 se logra visualizar que dentro de los montajes que componen todo el sistema, el costo de inversión más alto es el del fotobiorreactor en un 67% por el tipo de componentes y el tamaño de diseño.

Figura 42.

Porcentajes de inversión según cada sistema de diseño.



Nota. El diagrama permite dar un panorama de viabilidad según la inversión inicial

7.2. Costos indirectos

Estos gastos están asociados al consumo de energía para el proceso, el transporte de maquinaria, artículos de consumo o limpieza, herramienta de construcción, pues estos a pesar de que no están directamente relacionados con la elaboración de la producción del proyecto, pueden llegar a inferir en el costo de inversión.

Para lograr determinar los costos asociados al consumo de energía se realiza a partir de las tablas 63, 64, 65 y 66, en las cuales establecen la potencia según el tiempo de funcionamiento.

Tabla 63.

Especificaciones de la bomba Silver 10

Bomba de agua SILVER 10	
Características	Valor
Fase x Volts	1 x 220 V
HP	1
Amperios (AMP)	8
Potencia Nominal (kW)	0,75

Nota. Esta información se tomó a partir de la ficha técnica de los equipos Tomado de: A. P. SILVER, “Bomba Para Recircular El Agua,” 2018. https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-520808378-bomba-para-recircular-el-agua-en-piscina-12hp-46amp-220v-_JM#position=5&search_layout=stack&type=item&tracking_id=8b4591c3-e3cb-434e-9e4c-306687852996&gid=1&pid=4.

Tabla 64.

Especificaciones del compresor Pcp y Scuba

Compresor Rifle Pcp Y Scuba 4500 Psi	
Características	Valor
Fase x Volts	1 x 130 V
Potencia Nominal (kW)	1,8
Capacidad (PSI)	4500

Nota. Esta información se tomó a partir de la ficha técnica de los equipos. Tomado de: Y. HENG, “Compresor Rifle Pcp.” https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-484165465-compresor-rifle-pcp-y-scuba-4500-psi-entrega-inmediata-_JM?matt_tool=19390127&utm_source=google_shopping&utm_medium=organic.

Tabla 65.

Especificaciones de aireadores de paleta

Aireadores de paleta SINO-AQUA	
características	Valor
Fase x Volts	1 x 110 V
RPM	1720
Potencia Nominal (kW)	0,75
Amperios (AMP)	2,8

Nota. Esta información se tomó a partir de la ficha técnica de los equipos Tomado de: Acuagranja, “Aireadores de Paletas SINO-AQUA.”

Tabla 66.

Especificaciones del quemador EQA 79

Quemador EQA 79	
Características	Valor
Presión del gas (mm. CA)	200
Potencia Nominal (kW)	2,78

Nota. Esta información se tomó a partir de la ficha técnica de los equipos. Tomado de: EQA, “Quemador venturi.” p. 9001.

En la tabla 67, se plantea todo lo relacionado a los servicios, para determinar los costos de electricidad y agua, se tuvo en cuenta los datos planteados en la tabla 68,69 y en la tabla 70 se observa el consumo anual de energía teniendo en cuenta toda esta información.

Tabla 67.*Inversión sobre los gastos extras.*

Costos indirectos				
	Implementos	Monto	Cantidad	Total
Herramientas de construcción del biodigestor	Tarraja de 1/2"	\$ 248.200,00	1	\$ 248.200,00
Herramientas de construcción del horno	Manguera para nivel (100m)	\$ 35.900,00	1	\$ 35.900,00
Servicios públicos	Agua	\$ 6.175.137,89	1	\$ 6.175.137,89
	Electricidad	\$ 2.936.565,30	1	\$ 2.936.565,30
Costo total por costos extras				\$ 9.395.803,19

Nota. Toda la información se determinó a partir de varias fuentes bibliográficas que se pueden observar en el anexo VII

Para lograr determinar los costos indirectos relacionados al gasto anual de energía y agua, fue necesario evaluar los equipos que consumen estos servicios teniendo en cuenta los horarios de funcionamiento, así mismo el tiempo de cada lote según las características definidas en los numerales anteriores.

Dentro de la evaluación del servicio de agua consumida anualmente, como se observa en la tabla 66, los equipos que requieren de este servicio son el biodigestor y el fotobiorreactor, en donde se realiza el análisis a partir del volumen. El biodigestor luego de cumplir el primer tiempo de retención tiene un funcionamiento continuo, el cual necesita un flujo diario de la mezcla entre agua y estiércol, de esa manera restando los 35 días de funcionamiento del primer tiempo en un año, se logra determinar el consumo de agua anual.

Para el fotobiorreactor el consumo de agua se evalúa teniendo en cuenta el tiempo en donde el tanque tipo raceway está generando cultivo de Spirulina, a partir de esa fecha, como se mencionaba en el numeral 6.6, se realiza una remoción cada 4 días del 57% de agua que contiene el producto de interés, pero esa cantidad retirada debe complementarse con agua como se observa en la tabla 68.

Tabla 68.

Costo sobre el consumo de agua anual.

Gasto de agua anual	
Agua premezcla agua-estiércol m ³ /año	1.008,21
Agua fotobiorreactor m ³ /año	4.730,76
Total, m ³	5.738,97
\$/m ³ en Fúquene	1.076
Costo Total \$/año	6.175.137,89

Nota. Para determinar el consumo anual de agua, se tuvo en cuenta la cantidad total de agua a ingresar dentro del biodigestor y el fotobiorreactor con base a los tiempos en los que se debe realizar el ingreso de agua y descontando los días de mantenimiento

Para el consumo de energía dentro del diseño, los equipos como el sistema de ignición, el compresor de CO₂ para el fotobiorreactor y el molino de paletas para el fotobiorreactor hacer parte fundamental de la evaluación. Par determinar el costo se realiza a partir del valor de cada kWh teniendo en cuenta el sector rural donde se elabora el proyecto.

Según las características de cada sistema como el voltio y el amperio de cada equipo se logra calcular los kWh, en el cálculo del consumo se tuvo en cuenta el numeral 6.2, que establece que los sistemas de inyección de CO₂ y generación de movimiento tendrán un funcionamiento de 15 horas diarias, para el análisis en términos anuales se descuenta 30 días mientras el proyecto empieza a ser continuo, a partir de esa información se determina el consumo anual como se observa en la tabla 70.

En el caso de la bomba de agua, este equipo funciona cada 4 días y se establece un flujo de bombeo de 9m³/h, además el volumen a llenar es de 51,56 m³ según el numeral 6.5 que establece que la cantidad a retirar es un 57% del agua dentro del fotobiorreactor.

De manera que el tiempo por día de funcionamiento sería de 6 horas aproximadamente, con base a esa información se establece el consumo anual.[102]

Tabla 69.

Tiempo establecido de equipos por año

Horas de funcionamiento durante el año de cada equipo	Tiempo (h)
Bomba de agua SILVER 10	502,5
Compresor Rifle Pcp Y Scuba 4500 Psi	5.475
Aireadores de paleta SINO-AQUA	5.475
Quemador EQA 79	5,58

Nota. La selección del equipo se realizó teniendo el tiempo de funcionamiento máximo durante un día y la capacidad.

Tabla 70.

Costo sobre el consumo de energía anual.

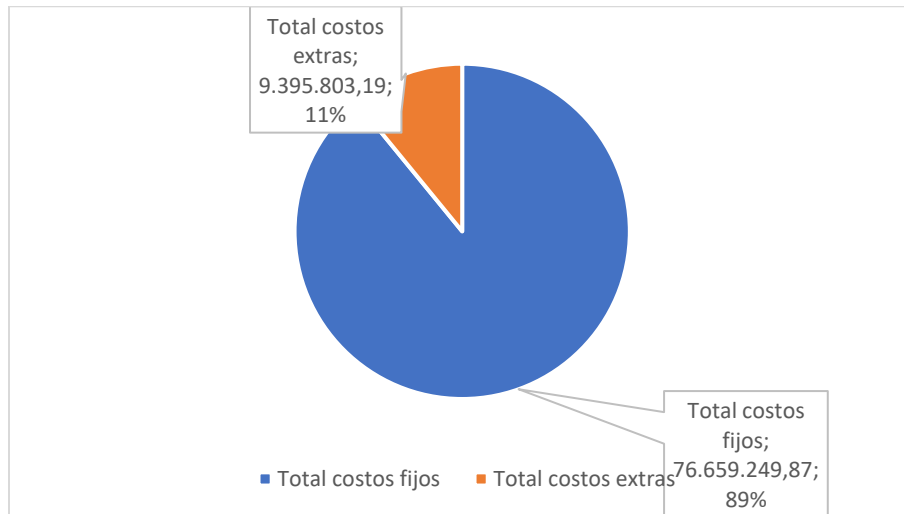
Gasto de energía anual	
Equipos que consumen energía	Vatio/h
Sistema ignición quemador kWh	14,71
Bomba de agua	376,875
Compresor de CO2 kWh	3416,4
Molino kWh	1686,3
Consumo total de energía kWh al año	5494,28
\$/kWh	534,47
Costo total \$	2.936.565

Nota. Según las especificaciones de los equipos mencionados, según el tiempo de funcionamiento se aplica el costo de acuerdo con el sector rural.

Con base en la información anterior, en la figura 43 se puede observar que los costos fijos tienen mayor impacto sobre la inversión sobre un 89%, este porcentaje refleja que los costos fijos al ser lo relacionado con la construcción total se debe contar inicialmente con \$76.669.249,87 millones de pesos para realizar el proyecto.

Figura 43.

Comparación entre gastos fijos y gastos extras anuales.



Nota. Este diagrama representa un valor promedio de inversión inicial

7.3. Ingresos

Para la estimación inicial de ingresos, es importante mencionar que el objetivo principal del proyecto va hacia la mitigación del daño de las fuentes hídricas alrededor de Fúquene, pero de igual manera para desarrollar un proyecto viable económicamente para la inversión, debe haber alguna fuente de ingresos que pueda sostener el proyecto a largo plazo.

De esa manera, a partir de la Spirulina producida se espera realizar el estudio de factibilidad desde el sector económico, pero a la vez manteniendo el objetivo principal, teniendo cuenta la información de la tabla 71, en donde se establece el valor de Spirulina en el mercado, así mismo la cantidad producida; es importante mencionar que esa cantidad producida cada 4 días, para garantizar que los rumiantes consuman el alga se decide que se agregará diariamente 3,2 kg de Spirulina en los bebederos a lo largo del día.

Con base en lo anterior, el valor de ingresos anuales manteniendo la suposición de que lo que se produzca anualmente se logre vender totalmente, en la tabla 71 se observa los

ingresos por la venta de Spirulina[103] y también se plantea el valor que no se debe contar de Spirulina producida por el porcentaje al que se debe alimentar cada bovino[104].

Tabla 71.

Ingresos por la venta Spirulina anual.

Valor de ingresos por venta	
Cantidad de proteína en los bovinos	Monto
Lote cada 4 días kg ST	17,74
Número de Lotes en el año	82,50
Cantidad de Spirulina kg/año producido	1463,55
Cantidad de agua por bovino lechero L/día	50,00
Cantidad de Spirulina en el agua kg/día para 280 bovinos	3,20
Cantidad de Spirulina en el agua kg/año	1.168,00
Cantidad de Spirulina Disponible para venta	295,55
\$/kg de Spirulina	\$ 420.663,11
Ingreso total por Spirulina	\$ 124.326.982,16

Nota. Se elabora a partir de las fuentes bibliográficas que sustentas los precios y los porcentajes de concentración de la Spirulina

7.4. Análisis financiero

Teniendo en cuenta que no existen los recursos financieros para el desarrollo del proyecto y puesta en marcha, se realiza el estudio financiero a partir de las características y los objetivos del proyecto para realizar la búsqueda de la mejor manera de financiar un préstamo del valor total de gastos proyectados en el año de \$86.942.771 COP pero por facilidad de cálculos se toma un valor neto de \$87.000.000 COP.

En Colombia por medio de la entidad financiera que cuenta con créditos para diferentes proyectos, en donde hay la existencia de una forma de crédito llamada Crédito Verde, este programa está destinado para financiar proyectos que contribuyan a la sostenibilidad con relación al medio ambiente, así mismos proyectos que reducen y mitigan el daño ambiental.

Una de las ventajas de este crédito es que tanto personas naturales o jurídicas que estén dentro del sector productivo de las zonas rurales aplican sin importar el tamaño del productor. Otras de las ventajas de adquirir este crédito son el subsidio en la tasa de interés y acceso a certificaciones ambientales y de calidad.

Inicialmente para el desarrollo del crédito, el proyecto se presenta como pequeña empresa, ya que se espera que el número de trabajadores no supera entre los 11 o 50 trabajadores. Según [105] del banco agrario, se muestra que la tasa de interés según el crédito verde es de 5,71% del IBR% efectivo anual, adicionalmente según el banco de la republica la tasa del IBR correspondiente al banco agrario es de 1,75% efectiva anual de [106].

Con base en la información anterior, la tasa efectiva a la cual se aplicará la solicitud del crédito es la sumatoria de las dos tasas, como resultado se obtiene 7,46% EA. A partir del cálculo, se decide distribuir los pagos mensuales en el término de 5 años, es decir, con un número de cuotas de 60.

El valor de la cuota mensual según la tasa anteriormente mencionada y el valor del préstamo es de un total de \$1.731.642 COP. Según la tabla 72, se debe pagar un excedente de \$16.898.505 COP por la tasa de interés, dando un total del valor del préstamo de \$103.898.505 COP.

Tabla 72.*Tabla de amortización del crédito*

N	Cuota	Interés	Kapital	Saldo
0	-	-	-	87.000.000
1	1.731.642	523.261,38	1.208.380	85.791.620
2	1.731.642	515.993,58	1.215.648	84.575.971
3	1.731.642	508.682,07	1.222.960	83.353.012
4	1.731.642	501.326,58	1.230.315	82.122.697
5	1.731.642	493.926,85	1.237.715	80.884.982
6	1.731.642	486.482,61	1.245.159	79.639.823
7	1.731.642	478.993,61	1.252.648	78.387.174
8	1.731.642	471.459,56	1.260.182	77.126.992
9	1.731.642	463.880,19	1.267.762	75.859.231
10	1.731.642	456.255,24	1.275.387	74.583.844
11	1.731.642	448.584,43	1.283.057	73.300.787
12	1.731.642	440.867,48	1.290.774	72.010.013
13	1.731.642	433.104,12	1.298.538	70.711.475
14	1.731.642	425.294,07	1.306.348	69.405.127
15	1.731.642	417.437,05	1.314.205	68.090.923
16	1.731.642	409.532,76	1.322.109	66.768.814
17	1.731.642	401.580,94	1.330.061	65.438.753
18	1.731.642	393.581,29	1.338.060	64.100.692
19	1.731.642	385.533,53	1.346.108	62.754.584
20	1.731.642	377.437,36	1.354.204	61.400.380
21	1.731.642	369.292,50	1.362.349	60.038.031
22	1.731.642	361.098,65	1.370.543	58.667.488

Tabla 72. Continuación

23	1.731.642	352.855,52	1.378.786	57.288.701
24	1.731.642	344.562,82	1.387.079	55.901.622
25	1.731.642	336.220,23	1.395.422	54.506.201
26	1.731.642	327.827,47	1.403.814	53.102.387
27	1.731.642	319.384,23	1.412.258	51.690.129
28	1.731.642	310.890,21	1.420.752	50.269.378
29	1.731.642	302.345,10	1.429.297	48.840.081
30	1.731.642	293.748,60	1.437.893	47.402.188
31	1.731.642	285.100,39	1.446.541	45.955.646
32	1.731.642	276.400,17	1.455.242	44.500.405
33	1.731.642	267.647,63	1.463.994	43.036.411
34	1.731.642	258.842,43	1.472.799	41.563.611
35	1.731.642	249.984,28	1.481.657	40.081.954
36	1.731.642	241.072,86	1.490.569	38.591.385
37	1.731.642	232.107,83	1.499.534	37.091.851
38	1.731.642	223.088,89	1.508.553	35.583.298
39	1.731.642	214.015,70	1.517.626	34.065.672
40	1.731.642	204.887,94	1.526.754	32.538.918
41	1.731.642	195.705,28	1.535.936	31.002.982
42	1.731.642	186.467,39	1.545.174	29.457.808
43	1.731.642	177.173,94	1.554.468	27.903.340
44	1.731.642	167.824,60	1.563.817	26.339.523
45	1.731.642	158.419,02	1.573.223	24.766.300
46	1.731.642	148.956,88	1.582.685	23.183.615
47	1.731.642	139.437,82	1.592.204	21.591.411
48	1.731.642	129.861,51	1.601.780	19.989.631
49	1.731.642	120.227,61	1.611.414	18.378.217
50	1.731.642	110.535,76	1.621.106	16.757.111
51	1.731.642	100.785,62	1.630.856	15.126.255
52	1.731.642	90.976,84	1.640.665	13.485.590

Tabla 72. Continuación

53	1.731.642	81.109,06	1.650.533	11.835.057
54	1.731.642	71.181,94	1.660.460	10.174.597
55	1.731.642	61.195,10	1.670.447	8.504.151
56	1.731.642	51.148,20	1.680.494	6.823.657
57	1.731.642	41.040,88	1.690.601	5.133.056
58	1.731.642	30.872,76	1.700.769	3.432.287
59	1.731.642	20.643,49	1.710.998	1.721.289
60	1.731.642	10.352,69	1.721.289	- 0
TOTAL	\$ 103.898.504,59	\$ 16.898.504,59	\$ 87.000.000,00	

Nota. Se establece según la amortización los valores finales de acuerdo con las tasas IBR+

Luego de determinar los costos por el crédito adquirido, se realiza el flujo de caja teniendo en cuenta el tiempo a lo largo del crédito, es decir, los 5 años para observar el comportamiento de la TIR como se muestra en la tabla 73.

Inicialmente con base en el numeral 7.3, se toma como proyección inicial el primer año de venta de Spirulina, para las proyecciones de ingresos por venta de los siguientes años, según la tabla 73, se estima un crecimiento de los porcentajes allí mencionados del valor anterior a cada año.

Para establecer el total de gastos, un gasto fijo a lo largo del tiempo del flujo de caja es el pago anual del crédito que corresponde a \$20.779.701 COP. Ahora bien, solamente para el primer año se tienen en cuenta los gastos por construcción y gastos extras, pero para los siguientes años no se tienen en cuenta. En todos los años se cuenta con gastos por consumo de agua y energía, a los cuales a partir del año 2 se incrementan al 4% del valor anterior a ese año para así establecer un comportamiento más aproximado a un cálculo experimental.

Teniendo en cuenta que cualquier proyecto necesita de personal que realice la mano de obra u otros servicios como ventas al mercado, para el primer año se toma la decisión de que los trabajadores dentro del hato lechero se les reorganizara labores para el diseño autosustentable sin afectar el rango de horario establecido para así no incrementar gastos por nuevos trabajadores en el primer año. Ya luego para los siguientes años se realiza la contratación de 4 trabajadores por un salario mínimo a medida de los años, se incrementará un 4%.

Como se observa en la tabla 73, también dentro de los gastos operativos u otros gastos, se estima anualmente gastos por primas y servicios de salud para los trabajadores presentes dentro del proyecto.

Finalmente, al hablar de ventas es importante resaltar que se debe destinar un monto anualmente para la incorporación al mercado por medio de los medios audiovisuales, ferias, entre otras más. Por lo cual se destina anualmente un valor de \$10.000.000 COP para este tipo de inversiones.

Tabla 73.

Desarrollo del flujo de caja

PRESUPUESTO DEL ESTADO DEL FLUJO DE CAJA					
DETALLE	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Saldo inicial	-	10.944.572	30.650.709	48.690.544	66.873.364
Proyección de ingresos	124.326.28 2	126.191.17 6	127.453.08 8	130.639.41 5	133.252.20 4
Total efectivo disponible	124.326.28 2	137.135.74 8	158.103.79 7	179.329.95 9	200.125.56 8

Tabla 73. Continuación

Pago anual de créditos	20.779.701	20.779.701	20.779.701	20.779.701	20.779.701
Gastos por construcción	76.746.968	-	-	-	-
Gastos por mantenimiento	-	5.000.000	5.100.000	5.202.000	5.306.040
Gastos por publicidad	-	10.000.000	10.000.000	10.000.000	10.000.000
Gastos por sueldos y otros gastos operativos	-	54.511.560	56.692.022	58.959.703	61.318.091
Gastos extra por construcción	284.100	-	-	-	-
Gastos por consumo de agua	6.175.138	6.422.143	6.679.029	6.946.190	7.224.038
Gastos por consumo de energía	9.395.803	9.771.635	10.162.501	10.569.001	10.991.761
Total pagos	113.381.710	106.485.039	109.413.253	112.456.595	115.619.631
Total Efectivo Neto	10.944.572	30.650.709	48.690.544	66.873.364	84.505.937

Nota. Se establecen los cálculos a partir del crédito de 5 años para determinar posteriormente la TIR.

Tabla 74.*Porcentaje de incremento por ingresos anuales*

% de proyección ingresos por venta anuales	
Primer año	-
Segundo año	1,50%
Tercer año	1,00%
Cuarto año	2,50%
Quinto año	2,00%

Nota. Los porcentajes se tomaron suponiendo que están en unas condiciones ni bajas, ni alta en crecimiento, simplemente constante.

De acuerdo con la tabla 75 donde se muestra que el valor de la TIR con base en el flujo de caja fue del 33,43%, en un principio se deseaba una tasa como mínimo del 30%, de manera que, entrando en sentido de comparación con el valor calculado y el valor estimado, se tiene un valor positivo por encima de 8,43%. Al análisis estos resultados, se demuestra la rentabilidad del proyecto para la puesta en marcha.

Tabla 75.*Resultados del cálculo de la TIR*

Detalles	Inversión Inicial
Flujo de Efectivo Neto	(87.000.000)
Inversión Inicial	(87.000.000)
Número de Años	5
Rendimiento proyecto al 28%	
Cálculo de la TIR	33,43%

Nota. Como expectativa teórica, se estimaba un valor como mínimos del 28% con respecto a la rentabilidad.

8. CONCLUSIONES

Se construyó el estado de arte para el diseño teórico de un proceso que permite obtener metano a partir de un biodigestor y biomasa a partir de un fotobiorreactor ubicado en la Laguna de Fúquene en Cundinamarca, Colombia. Para ello se tuvo como materia prima principal el excremento de vacas lecheras y se obtuvieron como productos biomasa para la alimentación del ganado y bioabono para su uso como fertilizante. Como resultado se obtuvo 83,06 m³/día de biogás para posteriormente obtener 17,79 kg de masa seca de Spirulina cada 4 días.

Se diseñó un proceso en el que los excrementos, a través de una fermentación anaerobia, se convierten en biogás y bioabono. El biogás fue tratado y posteriormente quemado para la obtención de dióxido de carbono el cual fue inyectado en un fotobiorreactor que tuvo como productos oxígeno y biomasa.

Debido a las condiciones ambientales fue necesario implementar diseños suplementarios que promueven las condiciones que favorecen la eficiencia del proceso. De igual manera, se establecieron temperaturas, presiones, flujos de entrada y salida, entre otros.

A partir del desarrollo de costos de ejecución, el valor de la tasa de retorno fue de 33,47%, e inicialmente se esperaba un valor como máximo del 28%. Con base en esos resultados se puede decir, que el proyecto presenta una buena viabilidad económica con la solicitud de un crédito desde una perspectiva netamente teórica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] SEDESOL, "Recolección Y Transferencia De Residuos."
- [2] J. P. P. E. Avilez, "Caracterización productiva de explotaciones lecheras empleando metodología de análisis multivariado," *Univ. Católica Temuco*, vol. 20, 2010.
- [3] A. Elein, L. Angel, and H. Annia, "Microorganismos benéficos como biofertilizantes eficientes para el cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill)," *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 7, no. 2, pp. 47–54, 2005.
- [4] J. Limongi, "Coproctor: un diseño para la industrialización de biodigestores rurales," *Iconofacto*, vol. 9, pp. 9–26, 2013.
- [5] FAO, *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*. 2019.
- [6] M. S. R. Maulana, "LOS BIODIGESTORES: FUENTE DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y CALIDAD DE VIDA EN COMUNIDADES RURALES DE COLOMBIA," *Ekp*, vol. 13, no. 3, pp. 1576–1580, 2017.
- [7] Y. Olaya and L. González, "Fundamentos para el diseño de Biodigestores- Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas," *J. Ekon. Malaysia*, vol. 51, no. 2, p. 31, 2009.
- [8] Ivan Corona Zúñiga, "Biodigestores," *Labour*, vol. 17, no. 2, pp. 299–314, 2003, doi: 10.1111/1467-9914.00232.
- [9] FAO, MINENERGIA, PNUD, and GEF, "Manual del Biogás," *Proy. CHI/00/G32*, p. 120, 2011.
- [10] Perez, "Pequeños Ganaderos Y Lecheros Mecanico," 2010.
- [11] P. O. R. La, D. Anaerobica, D. E. L. A. Materia, and L. A. Hernández, "Tecnologías para el aprovechamiento del gas producido por la digestión anaeróbica de la materia orgánica Technologies for the utilization of gas derived from anaerobic digestion of organic matter," *Agron. Colomb.*, vol. 13, no. 1, pp. 76–90, 1996.
- [12] T. D. E. P. Cultivo *et al.*, "U p i b," 2015.

- [13] R. Giraldo, "EVALUACIÓN DE CEPAS DE MICROALGAS PARA CAPTURA DE CO₂," 2013.
- [14] OLIVIA BERTHA, "CONCENTRACIÓN, RECuento CELULAR Y TASA DE CRECIMIENTO."
- [15] M. Alvarez Cobelas and T. Gallardo García, "Una revisión sobre la biotecnología de las algas," *Una revisión sobre la Biotecnol. las algas*, vol. 15, no. 15, pp. 9–60, 1989, doi: 10.5209/BOCM.7403.
- [16] P. Batista, "Comparison of microalgal biomass profiles as novel functional ingredient for food products," *Algal Res.*, vol. 2, no. 2, pp. 163–173, 2013.
- [17] Q. Huang, "Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms," vol. 3, no. 3, pp. 318–329.
- [18] M. Fernández, "Diseño , montaje y caracterización de fotobiorreactores airlift para el cultivo de la microalga *Chlorella sorokiniana*," p. 47, 2013.
- [19] Pedraza C, "Evaluación de la biofijación de CO₂ y producción de biomasa a partir de las microalgas bajo condiciones de fotobiorreactor escala laboratorio," 2018.
- [20] L. Ramirez, "PHOTOBIOREACTOR: TOOL FOR MASS CULTIVATION OF CYANOBACTERIA," vol. 6, pp. 9–19, 2019.
- [21] M. D. M. Carvajal-Oses, J. Chacón-Guzmán, and Á. Herrera-Ulloa, "Optimización en la producción de la microalga marina *Nannochloropsis oculata* en un fotobiorreactor tubular helicoidal," *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 31, no. 2, p. 117, 2018, doi: 10.18845/tm.v31i2.3629.
- [22] A. Janés, "Proyecto de diseño de una planta para la producción de cianobacterias (*Arthrospira platensis*) en fotobiorreactores," *Univ. Jaume*, 2019.
- [23] RedBioLAC, "Webinar: Biodigestores en granjas lecheras: estimación de generación de excretas y efluentes."
- [24] A. Palacios, "Ranking Lacteo." .
- [25] My Fitness Pal, "Colanta." .

- [26] M. J. Periago, "HIGIENE, INSPECCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE LA LECHE." .
- [27] N. G. Hossein-Zadeh, "Application of growth models to describe the lactation curves for test-day milk production in holstein cows," *J. Appl. Anim. Res.*, vol. 45, no. 1, pp. 145–151, 2017, doi: 10.1080/09712119.2015.1124336.
- [28] O. F. Camacho Molano, "Plan de Negocio. Hato de Producción Lechera," *J. Pers. Soc. Psychol.*, vol. 1, no. 1, p. 144, 2017.
- [29] M. Viñas, "Estimación de los parámetros nacionales y básicos para el procesamiento y utilización de los residuos sólidos y líquidos de tambos," 2004.
- [30] H. Dong *et al.*, "Capítulo 10: Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol," *2006 IPCC Guidel. Natl. Greenh. Gas Invent.*, pp. 10–91, 2006.
- [31] Raul botero botero y thomas R. Preston, "Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible," *Agriculture*, p. 20, 1987.
- [32] S. Genoveva, M. Esther, A. Enriquez-padilla, and J. Uriel, "Evaluación del potencial de generación de estiércol como materia prima para la producción de biogás en la Zona Altamira , Tamaulipas," vol. 4, no. 10, pp. 34–40, 2017.
- [33] A. Bautista, "Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos," *Univ. Carlos III Madrid*, p. 64, 2010.
- [34] E. Lara and M. Hidalgo, "Diseño de un Biodigestor y conducción del biogás Generado por las Excretas de Ganado Vacuno, Estación Tunshi-Espoch," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2011.
- [35] M. Hernandez Rueda, "Estudio de biodigestores anaerobicos utilizando tecnología combinada de biomasa y solar termica para el montaje de un novedoso y autosustentable sistema de generación de energía," *Univ. Nac. Autónoma Nicar. León*.
- [36] A. Gasc *et al.*, "Diseño conceptual de un biodigestor partiendo de estiércol vacuno y avicola, producido en la finca el Guarumal, para la obtención de biogás," *Photosynthetica*, vol. 2, no. 1, pp. 1–13, 2018.

- [37] L. A. Rodríguez Perdigón, "Technical feasibility of biogas production from organic fraction of municipal solid waste - FORSU," 2014.
- [38] S. A. Salazar and H. Y. Torres, "Análisis de viabilidad de la implementación de biodigestores como alternativa energética para familias del área rural," *Sustain.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–14, 2019.
- [39] J. Martí Herrero, *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*. 2019.
- [40] L. Huerga, I. R.; Butti, M.; Venturelli, *Biodigestores a pequeña escala. Un analisis practico sobre su factibilidad*, vol. 55. 2014.
- [41] E. Toala, "Diseño de un biodigestor de polietileno para la obtención de biogas a partir del estiercol de ganado en el rancho Veronica," 2013.
- [42] Sistema Biobolsa, "MANUAL DE USUARIO. Uso y mantenimiento del biodigestor.," pp. 1–5, 2017.
- [43] C. V. Calderón Puente and F. Rivera, "Diseño de un biodigestor tubular para obtener biogas a partir de residuos orgánicos del ganado vacuno generados en la Hacienda 'Santa Mónica' Guamote," *Fac. Ciencias*, vol. Bachelor, p. 77, 2015.
- [44] "Propiedades Termicas De Algunos Gases Y Vapores," pp. 414–420.
- [45] OIT, "Ficha de seguridad del Metano," 2018. .
- [46] E. Dzuba, "H₂S un reto creciente en la industria del gas y el petróleo," *Dräger Eng. Solut.*, vol. 15, no. 1, p. 52, 2015.
- [47] P. Apella, María; Araujo, "Microbiología de agua. Conceptos básicos," *Dign. su arte*, pp. 13–30, 2019, doi: 10.31819/9783954871568-002.
- [48] M. Cano-Hernández, A. Bennet-Eaton, E. Silva-Guerrero, S. Robles-González, U. Sainos-Aguirre, and H. Castorena-García, "Caracterización de bioles de la fermentación Anaeróbica de excretas bovinas y porcinas," *Agrociencia*, vol. 50, no. 4, pp. 471–479, 2016.
- [49] J. Macías-Zamora, "Dissolved methane in the sills region of the Gulf of

California,” *Ciencias Mar.*, vol. 39, no. 2, pp. 119–135, 2013, doi: 10.7773/cm.v39i2.2232.

[50] S. Maithel, “Biomass Energy,” *APCTT*, 2009.

[51] R. Steffen, O. Szolar, and R. Braun, “Feedstocks for anaerobic digestion,” *Inst. Agrobiotechnology Tulin, Univ. Agric. Sci. Vienna*, pp. 1–29, 1998.

[52] E. Sánchez, R. Borja, P. Weiland, L. Travieso, and A. Martín, “Effect of temperature and pH on the kinetics of methane production, organic nitrogen and phosphorus removal in the batch anaerobic digestion process of cattle manure,” *Bioprocess Eng.*, vol. 22, no. 3, pp. 247–252, 2000, doi: 10.1007/s004490050727.

[53] F. Ramirez, Aurora; Meschy, “Requerimiento de fósforo de los Microorganismos ruminales: una revisión.” 2005.

[54] “Nutrición microbiana.” .

[55] J. Cabos Sánchez, C. B. Bardales Vásquez, C. A. León Torres, and L. A. Gil Ramírez, “Evaluación de las concentraciones de Nitrógeno, Fósforo y Potasio del biol y biosol obtenidos a partir de estiércol de ganado vacuno en un biodigestor de geomembrana de policloruro de vinilo,” *Arnaldoa*, vol. 26, no. 3, pp. 1165–1176, 2019, doi: 10.22497/arnaldoa.263.26321.

[56] L. Arellano, M. Cruz, and C. Huerta, *El estiércol, material de desecho, de provecho y algo más.*, no. March. 2014.

[57] I. de I. y T. I. Centroamericano, “Biogas y bioabono, aplicaciones,” 1985.

[58] J. McGarry, M.G.; Stainforth, *Compost, fertilizer, and biogas production from human and farm wastes in the People’s Republic of China*. 1978.

[59] Mercado libre, “Biol Y Biosol Abonoorgánico.” .

[60] J. Del Real Olvera, “Evaluación y modelado de la cinética de depuración anaerobia de vinazas de la industria alcoholera,” p. 136, 2007.

[61] Bp and International Gas Union, “Guidebook to Gas Interchangeability and Gas Quality,” *Secretary*, vol. 6, p. 154, 2011.

- [62] Z. Sidartha, J. C. Mendoza, L. S. Gonzalez, F. L. Kaiser, and A. Gebauer, "Guía de Biogás para el sector porcícola en Colombia," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2020.
- [63] N. Técnica, "NTC," 1997.
- [64] C. D. E. La, C. D. E. La, C. D. E. La, and A. D. E. La, *MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA NORMOGRAMA PROCESOS DEL MME CORTE ABRIL 2018 NORMOGRAMA PROCESOS DEL MME CORTE ABRIL 2018*. 2018.
- [65] S. N. de A. (SENA), "Biodigestor tipo salchicha o taiwan.pdf," *El biodigestor de plastico familiar*. p. 18.
- [66] PUXIN, "Auxiliar Agent Chemical." .
- [67] R. G. Soutullo, "Los Diferentes Tipos de Válvulas," *Ing. Mar.*, 2013.
- [68] WEISZ, "MONTAJE, UTILIZACIÓN Y MANTENIMIENTO DE MANÓMETROS," no. 01, pp. 1–12, 1928.
- [69] C. De Instalaciones, "Tubos y Accesorios de PVC Conduit Cuando usted especifique Tubos y Accesorios de Presentación Doblado de Tubería Para doblar y formar Tubos de PVC Conduit DURMAN ESQUIVEL , siga los pasos que a continuación indicamos :," 2005.
- [70] K. Lambert and M. Izquierdo, "Limites de inflamabilidad," *Cfbt-Be*, pp. 1–10, 2016.
- [71] I. de I. y T. I. Centroamericano, "Biogas Y Bioabono," 1985.
- [72] P. Fernandez Diez, "Introducción a la combustión," *Introd. a las Cent. térmicas*, vol. 25, no. 3, pp. 401–442, 2008.
- [73] C. Arrieta, A. Amell, L. Iral, Á. Valencia, and A. Cardona, "Análisis de la combustión de metano y una mezcla equimolar metano-syngas en un quemador de combustión estabilizada en la superficie: eficiencia y emisiones contaminantes," *Ingenius*, no. 12, pp. 46–54, 2014, doi: 10.17163/ings.n12.2014.06.
- [74] A. E. Valle, M. R. Batista, C. E. Tuna, C. L. Vorobieff, and J. L. Silveira, "Análisis

Energético , Exergético y Ecológico Aplicado en un Motor de Combustión Interna de Pequeño Porte Accionado con Biogas,” *Xi Latin-American Congr. Electr. Gener. Transm. - Clagtee 2015*, no. November, 2015.

[75] A. Valverde G., B. Sarria López, and J. Monteagudo Yanes, “Evaluación De La Eficiencia Energética De Un Horno Que Utiliza Como Combustible Cascarilla De Arroz.,” *Sci. Tech.*, vol. 5, no. 37, pp. 175–180, 2007, doi: 10.22517/23447214.4049.

[76] J. M. D. Cerdeira, J. S. Cid, J. U. Martínez, P. G. Otaola, and J. Almeida, “Guía básica de calderas industriales eficientes,” *Cons. Econ. y Hacienda, Organ. Dir. Gen. Indus- tria, Energía y Minas.*, vol. 3, pp. 71–95, 2012.

[77] C. N. D. P. M. LIMPIA, “Hornos y combustión,” *Operaciones petroleras*, 2015. .

[78] M. Lozano, J. Ramírez, and C. Vásquez, “Manual de Hornos Cerámicos a Gas con Tecnología Apropiada,” 2013.

[79] J. A. C, F. De Química, U. Nacional, and M. De San, “Balances De Materia Y De Energía Para La Determinación De La Eficiencia Térmica En Calderas,” *Rev. Peru. Química e Ing. Química*, vol. 9, no. 1, pp. 54–62, 2006.

[80] J. L. Stokes, “Commercial production of microalgae: ponds, tanks, and fermenters,” *Science (80-)*, vol. 131, no. 3399, p. 496, 1999, doi: 10.1126/science.131.3399.496.

[81] S. Delgado and D. Castillo, “Influencia De La Temperatura En El Crecimiento De Un Consorcio Microbiano Y Su Capacidad Bioxidativa Sobre El Hierro De La Calcopirita,” *Ecol. Apl.*, vol. 18, no. 1, p. 85, 2019, doi: 10.21704/rea.v18i1.1310.

[82] C. Jiménez, B. R. Cossío, and F. X. Niell, “Relationship between physicochemical variables and productivity in open ponds for the production of Spirulina: A predictive model of algal yield,” *Aquaculture*, vol. 221, no. 1–4, pp. 331–345, 2003, doi: 10.1016/S0044-8486(03)00123-6.

[83] C. Microbiano, “Reproduccion Y Recimiento Microbiano,” *Fac. Farm.*, pp. 1–23, 2009.

- [84] J. Cheng, W. Guo, K. Ameer Ali, Q. Ye, G. Jin, and Z. Qiao, "Promoting helix pitch and trichome length to improve biomass harvesting efficiency and carbon dioxide fixation rate by *Spirulina* sp. in 660 m² raceway ponds under purified carbon dioxide from a coal chemical flue gas," *Bioresour. Technol.*, vol. 261, pp. 76–85, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.04.017.
- [85] R. E. Huarachi Olivera, U. A. Yapo Pari, A. P. Dueñas Gonza, J. Condori Huamanga, D. Pacheco Salazar, and J. Soto Flores, "Cultivo de *Arthrospira platensis* (*Spirulina*) en fotobiorreactor tubular doblemente curvado a condiciones ambientales en el sur del Perú," *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 17, no. 1, pp. 143–150, 2015, doi: 10.15446/rev.colomb.biote.v17n1.50679.
- [86] A. . Fallis, "Estudio De La Capacidad De Biofijación De Co₂ De Una Laguna Algal De Alta Tasa En Condiciones Del Trópico," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [87] G. Pedraza, "Cultivo de *Spirulina maxima* para suplementación proteica," *FAO*. .
- [88] Universidad de Granada, "Efectos de los factores ambientales sobre los procariotas." .
- [89] U.S. Department of agriculture, "Food Data Central," *Agricultural research service*, 2020. .
- [90] E. S. Divakaran; Duerr, "Characteristics of a blue-green alga (*Spirulina platensis*) preserved by acidulation with sulfuric acid," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 4, pp. 568–570, 1987.
- [91] S. Gunes, S. Tamburaci, M. C. Dalay, and I. D. Gurhan, "In vitro evaluation of spirulina platensis extract incorporated skin cream with its wound healing and antioxidant activities," *Pharm. Biol.*, vol. 55, no. 1, pp. 1824–1832, 2017, doi: 10.1080/13880209.2017.1331249.
- [92] J. P. Jourdan, "Manuel de Culture Artisanale de *Spirulina*," *Culture*, p. 239, 2011.
- [93] B. David and T. Urango, "Diseño conceptual de un proceso de cultivo y obtención de Cyanobacteria *Arthrospira Platensis*," *Univ. EAFIT*, pp. 28–42, 2008.

- [94] Nicolas, "El método de secado de la Espirulina interfiere en su calidad ¿lo sabías?," *Ecospirulina*, 2015. .
- [95] T. Panjaitan, S. P. Quigley, S. R. McLennan, and D. P. Poppi, "Effect of the concentration of Spirulina (*Spirulina platensis*) algae in the drinking water on water intake by cattle and the proportion of algae bypassing the rumen," *Anim. Prod. Sci.*, vol. 50, no. 6, pp. 405–409, 2010, doi: 10.1071/AN09194.
- [96] P. Álvarez, "Influencia de la luz sobre la producción y la composición de la biomasa microalgal de *Spirulina platensis* LMPA55," *Esc. Posgrado - Fac. Reg. Buenos Aires*, p. 90, 2018.
- [97] A. Halmemies-Beauchet-Filleau *et al.*, "Review: Alternative and novel feeds for ruminants: Nutritive value, product quality and environmental aspects," *Animal*, vol. 12, no. s2, pp. S295–S309, 2018, doi: 10.1017/S1751731118002252.
- [98] B. W. B. Holman and A. E. O. Malau-Aduli, "Spirulina as a livestock supplement and animal feed," *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. (Berl)*., vol. 97, no. 4, pp. 615–623, 2013, doi: 10.1111/j.1439-0396.2012.01328.x.
- [99] A. Sobarzo, "Formulación de Presupuesto y Cronograma en un Proyecto de Investigación," *Univ. Peru. Cayetano Hered.*, 2012.
- [100] Y. HENG, "Compresor Rifle Pcp." https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-484165465-compresor-rifle-ppc-y-scuba-4500-psi-entrega-inmediata-_JM?matt_tool=19390127&utm_source=google_shopping&utm_medium=organic.
- [101] EQA, "QUEMADOR VENTURI." p. 9001.
- [102] A. P. SILVER, "Bomba Para Recircular El Agua," 2018. https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-520808378-bomba-para-recircular-el-agua-en-piscina-12hp-46amp-220v-_JM#position=5&search_layout=stack&type=item&tracking_id=8b4591c3-e3cb-434e-9e4c-306687852996&gid=1&pid=4.
- [103] EARTHRISE, "Spirulina Natural." .

- [104] FINAGRO, “Ganadero: vigile el balance de forraje y concentrado para sus bovinos,” *Minist. Agric.*, 2017.
- [105] B. AGRARIO, “TASAS DE CRÉDITOS,” no. 1.
- [106] B. de la República, “Indicador Bancario de Referencia (IBR),” 2021.
<https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/indicador-bancario-referencia-ibr>.
- [107] S. A. Neshat, M. Mohammadi, G. D. Najafpour, and P. Lahijani, “Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. May, pp. 308–322, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.137.
- [108] National Center for Biotechnology Information, “Carbon monoxide,” *PubChem Compound Summary for CID 281*, 2021. .
- [109] M. Izaguirre, Z. Ivania, L. Vega, and J. Alejandro, “Estudio de pre factibilidad para el aprovechamiento del biogás con fines energéticos a partir del estiércol de ganado bovino e,” 2009.
- [110] Homecenter, “Tubo CPVC 1/2"x 5 m.” .
- [111] Homecenter, “Codo 90 x 1/2 Roscado x Soldado Presión.” .
- [112] Mercadolibre, “Válvula Globo Roscable 1/2 Fabricado En Laton.” .
- [113] Homecenter, “Unión 2 Presión.” .
- [114] Mercado libre, “SISTEMA SLIM 1.” .
- [115] Alibaba, “Veniceton de la digestión anaerobia de biogás planta de energía bio gas digestor.” .
- [116] PAVCO, “Tubo Novafort 6"X 6 Mts Pavco.” .
- [117] Homecenter, “Tanque 6.000 Litros Color Negro.” .
- [118] FERROPLAS VALLE SAS palmira, “Plástico Negro 4 Mts De Ancho X 12 Mts Largo Calibre 4.” .

- [119] Geotextile production, “Geomembrana de 0,7mm HDPE Biofloc.” .
- [120] Mercado libre, “Válvula De Alivio De Temperatura Y Presión De 1/2.” .
- [121] C. de Tornillo, “EVANS.” .
- [122] CALIPSO, “Malla Anti-Insecto Blanco Ancho de 1m.” .
- [123] “Malla 40 micras.” .
- [124] Acuagranja, “Aireadores de Paletas SINO-AQUA.” .
- [125] Superintendencia de Servicios Públicos, *Evaluación Integral De Prestadores Empresa De Servicios Públicos De Soata – Superintendencia Delegada Para Acueducto , Grupo Pequeños Prestadores*. 2018.
- [126] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS (CREG), “TARIFAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA (\$/kWh) REGULADAS POR LA COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS (CREG),” p. 1, 2019.
- [127] Manual Estructuración del Trabajo de Grado. Fundación Universidad de América, 2021. [PDF]

GLOSARIO

Biodegradabilidad: la capacidad de los microorganismos para degradar el medio ambiente o contaminantes depende de los grupos funcionales químicos presentes.

Biodigestor: reactor donde ocurre la degradación de los residuos orgánicos por medio de la digestión anaeróbica realizada por bacterias por las cuales se obtiene biogás.

Biomasa: materia orgánica obtenida por residuos o desechos orgánicos ya sea de origen animal o vegetal la cual produce energía por medio de la fotosíntesis.

Biogás: una mezcla de gases producidos por digestión anaeróbica de desechos orgánicos, que comprenden principalmente metano y dióxido de carbono con trazas de hidrógeno, nitrógeno y vapor de agua. Usado como combustible.

Cámara de combustión: cámara diseñada para confinar y controlar la generación de calor y energía de la quema de combustibles. todo el volumen en el que tiene lugar la combustión, incluido el exterior de los tubos de llama) ocupado por aire de dilución.

***Chlorella vulgaris*:** microalga unicelular de forma esférica sin flagelos, perteneciente al género *Chlorophyta* que requieren luz y CO₂ como nutrientes.

Clorofila: pigmentos fotosintéticos verdes de la clase de porfirinas que se encuentran en hojas y otros tejidos vegetales.

Dióxido de carbono: sustancia en forma gaseosa a temperatura ambiente, fórmula CO₂. Se produce durante el proceso de combustión de combustibles fósiles.

Estiércol: materia orgánica producida por animales que se utiliza como sustrato en la digestión anaerobia por ser una excelente fuente de nutrientes, especialmente nitrógeno para utilizar en el proceso de producción de biogás eventualmente conduce a la contaminación del agua subterránea.

Fermentación anaeróbica: transformación en la cual las bacterias anaeróbicas encargadas de realizar el proceso de producción de biogás mediante la digestión anaeróbica pueden reducir los lodos de depuradora a hidrocarburos, particularmente metano en ausencia de oxígeno.

Fotoinhibición: la abolición reversible de actividades biológicas específicas por acción de la luz en exceso.

Fotón: la menor cantidad posible de radiación electromagnética que puede ser caracterizado por una frecuencia definida.

Fotosíntesis: término dado a la serie de reacciones metabólicas que ocurren en ciertos organismos autótrofos, por lo que los compuestos orgánicos libres se sintetizan mediante la reducción de dióxido de carbono utilizando energía absorbida por clorofila de la luz del sol.

Hato lechero: son vacas ganaderas criadas para producir grandes cantidades de leche, a partir de la cual se elaboran los productos lácteos.

Ignición: el proceso de encender un material para que comience a arder.

Irradiancia: un término radiométrico para la velocidad a la que se transfiere la energía radiante a través de una unidad de área de una superficie, comúnmente medido en vatios por metro cuadrado.

Irradiación: la integración de irradiancia durante un período de tiempo específico, comúnmente medido en julios por cuadrado metro.

Gases de efecto invernadero: un gas compuesto por moléculas que absorben y vuelven a irradiar radiación electromagnética infrarroja. Cuando está presente en la atmósfera, por lo tanto, el gas contribuye a el efecto invernadero. En la Tierra, el director los gases de efecto invernadero son vapor de agua, carbono dióxido, metano, óxido nitroso, ozono y ciertos compuestos halocarbonados.

ANEXO 1

Comparison of the properties of different large-scale algal culture systems

Reactor type	Mixing	Light utilisation efficiency	Temperature control	Gas transfer	Hydrodynamic stress on algae	Species control	Sterility	Scale-up	Reference
Unstirred shallow ponds	Very poor	Poor	None	Poor	Very low	Difficult	None	Very difficult	Borowitzka and Borowitzka, 1989
Tanks	Poor	Very poor	None	Poor	Very low	Difficult	None	Very difficult	Fox, 1983
Circular stirred ponds	Fair	Fair-good	None	Poor	Low	Difficult	None	Very difficult	Tamiya, 1957; Stengel, 1970; Soeder, 1981
Paddle-wheel Raceway Ponds	Fair-good	Fair-good	None	Poor	Low	Difficult	None	Very difficult	Weissman and Goebel, 1987; Oswald, 1988
Stirred Tank reactor (internal or external lighting)	Largely uniform	Fair-good	Excellent	Low-high	High	Easy	Easily achievable	Difficult	Pohl et al., 1988
Air-Lift reactor	Generally uniform	Good	Excellent	High	Low	Easy	Easily achievable	Difficult	Jüttner, 1977
Bag Culture	Variable	Fair-good	Good (indoors)	Low-high	Low	Easy	Easily achievable	Difficult	Baynes et al., 1979
Flat-Plate reactor	Uniform	Excellent	Excellent	High	Low-high	Easy	Achievable	Difficult	Hu et al., 1996; Tredici and Zitelli, 1997
Tubular reactor (Serpentine type)	Uniform	Excellent	Excellent	Low-high	Low-high	Easy	Achievable	Reasonable	Richmond et al., 1993; Torzillo, 1997
Tubular Reactor (Biocoil type)	Uniform	Excellent	Excellent	Low-high	Low-high	Easy	Achievable	Easy	Borowitzka, 1996

ANEXO 2

En 1 m ²											
Inicial	t= 4 días			Cantidad a retirar			Después de retirar			Después de añadir agua	
	Capacidad	g	g	kg a retirar	kg	g	Capacidad	g	g	Capacidad	g
Capacidad	299400,00		299992,97		0,5930			172290,16			299400,00
CO ₂ fijado	0,00	g	102,00	Volumen a retirar	0,128	m ³	CO ₂ fijado	0,00	g	CO ₂ fijado	0
	0,00	mmol	2,32	Porcentaje vol que se queda				0,00	mmol		0
Spirulina	80,00	g	139,30		57,43%		Spirulina	80,00	g	Spirulina	80,00
	3,13	mol	5,44					3,13	mol		3,13
		m ³	1,1E-03				Agua	8,1E-04	m ³		0,00
Agua	0,30	m ³	0,30	Agua a introducir			Agua	0,17	m ³	Agua	0,30
	298600,00	g	298600,00					171490,16	g		298600,00
Agua biomasa	720,00	m ³	1253,67		127109,84	g	Agua biomasa	720,00	m ³	Agua biomasa	720,00
	0,00	% spirulina	0,005					0,00	% spirulina		0,00
Composición másica	0,997	% agua	0,995				Composición másica	0,005	% spirulina	Composición másica	0,003
								0,995	% agua		0,997
Volumen total	0,30	m ³	0,30	Volumen total		m ³	Volumen total	0,17	m ³	Volumen total	0,30

En todo el tanque											
Inicial	t= 4 días			Cantidad a retirar			Después de retirar			Después de añadir agua	
	Capacidad	g	g	kg a retirar	kg	g	Capacidad	g	g	Capacidad	g
Capacidad	89820000,000		89881121,779		61,1218			51619985,0696			89820000,00
CO ₂ fijado	0,000	g	30600,000	Volumen a retirar	38,34717	m ³	CO ₂ fijado	0	g	CO ₂ fijado	0
	0,000	mmol	695,297	Porcentaje vol que se queda				0	mmol		0
Spirulina	24000,000	g	41788,988		57,43%		Spirulina	24000,00	g	Spirulina	24000,00
	938,059	mol	1633,355					938,06	mol		938,06
	3,1E-01	m ³	4,1E-01				Agua	0,25	m ³		0,25
Agua	89760	m ³	89,643	Agua a introducir			Agua	51,48	m ³	Agua	89,76
	89580000,000	g	8946231,902					51379985,07	g		89580000,00
Agua biomasa	216000,000	g	376100,890		38200014,93	g	Agua biomasa	216000,00	g	Agua biomasa	216000,00
	0,216	m ³	0,377					0,22	m ³		0,22
Composición másica	0,003	% spirulina	0,005				Composición másica	0,005	% spirulina	Composición másica	0,003
		% agua	0,995					0,995	% agua		0,997
Volumen total	90,013	m ³	90,083	Volumen total		m ³	Volumen total	51,74	m ³	Volumen total	90,01

ANEXO 3

Estimación del costo de inversión en todo el biodigestor

Costo de inversión		Fuente
Sistema de diseño	Gastos Fijos	
Mano de obra del biodigestor	Limpieza del terreno	[109][109]
	Excavación del terreno	
	Instalación	
	Transporte del material	
Conducción de biogás	Tuberías de biogás en PVC de 1/2" (m)	[110][110]
	Codos en PVC	[111][111]
	Llaves de bola de 1/2"	[112][112]
	Niples de PVC de 1/2"	[113][113]
	Filtro de sulfhídrico	[114][114]
	Tanque de almacenamiento de biogás	[115][115]
Montaje Biodigestor	Tubería de PVC de 6" (m)	[116][116]
	Tanque 6-7m ³	[117][117]
	Plástico aislante para la zanja	[118][118]
	Biodigestor L=20m y D=4m 260 M ²	[119][119]
	Válvula De Alivio De Temperatura Y Presión De 1/2	[120]

ANEXO 4

Estimación del costo de inversión para el diseño del horno

Maestro de obras Vicente Garcia					
Presupuesto estimado horno de ladrillo					
Bogotá D.C. Distrito Capital Cel: 3204083288					
				Fecha Solicitud	07-06-21
Solicitado por:	Laura Piñeros	Laura Alejandra Piñeros Solano			
Producto	Cantidad	Descripción	Precio / unidad	Precio	
Ladrillos	15	Área de tapadera	\$ 1.700,00	\$ 25.500,00	
Malla N° 60	1	Alto: 87cm Diámetro:73cm	\$ 30.600,00	\$ 30.600,00	
Fibra refractaria	1	Metros	\$ 178.000,00	\$ 178.000,00	
Cemento	1	Cemento blanco o gris	\$ 25.000,00	\$ 25.000,00	
Quemador Aire forzado	1	Rey Kooker Wkaf1b Quemador De Alta Presión	\$ 176.900,00	\$ 176.900,00	
Tuberías	1	Cobre	\$ 19.000,00	\$ 19.000,00	
Conducto aluminio	1	Conducto Flexible De Aluminio	\$ 44.500,00	\$ 44.500,00	
Subtotal				\$ 499.500,00	
Total				\$ 499.500,00	

ANEXO 5

Estimación del costo de inversión para el fotobiorreactor

Ingeniero Civil Rubén Cortes				
Cel: 3024285457				
Cotización Tanque tipo Raceway con sistema de inyección de CO2				
* ESTIMANDO PAREDES DE 12 CM DE ESPESOR				
OPCION 1 SUBTERRANEA				
	UND	CANT	VR UNIT	VR TOTAL
1	EXCAVACION MECANICA MATEERIAL COMUN	120.96	\$ 42,000.00	\$ 5,080,320.00
2	CONCRETO POBRE (OPCIONAL)	288	\$ 22,000.00	\$ 6,336,000.00
3	PLACA DE CONTRAPISO EN MORTERO IMPERMEABILIZADO	34.56	\$ 500,000.00	\$ 17,280,000.00
4	MURO EN CONCRETO IMPERMEABILIZADO E= 12 CM	2.952	\$ 500,000.00	\$ 1,476,000.00
5	MALLA ELECTROSOLDADA 4MM	21	\$ 131,000.00	\$ 2,751,000.00
				\$ 32,923,320.00
OPCION 2 SUBTERRANEA				
1	EXCAVACION MECANICA MATEERIAL COMUN	120.96	\$ 42,000.00	\$ 5,080,320.00
2	CONCRETO POBRE (OPCIONAL)	288	\$ 22,000.00	\$ 6,336,000.00
3	PLACA DE CONTRAPISO EN MORTERO IMPERMEABILIZADO	34.56	\$ 490,000.00	\$ 16,934,400.00
4	MURO EN LADRILLO TOLETE	82	\$ 25,000.00	\$ 2,050,000.00
5	PAÑETE IMPERMEABILIZADO	82	\$ 13,800.00	\$ 1,131,600.00
6	MALLA ELECTROSOLDADA 4MM	21	\$ 131,000.00	\$ 2,751,000.00
				\$ 29,203,000.00
OPCION 3 SUPERFICIAL				
1	CONCRETO POBRE (OPCIONAL)	288	\$ 22,000.00	\$ 6,336,000.00
2	PLACA DE CONTRAPISO EN MORTERO IMPERMEABILIZADO	34.56	\$ 490,000.00	\$ 16,934,400.00
3	MURO EN CONCRETO IMPERMEABILIZADO E= 12 CM	2.952	\$ 500,000.00	\$ 1,476,000.00
4	MALLA ELECTROSOLDADA 4MM	21	\$ 131,000.00	\$ 2,751,000.00
				\$ 27,497,400.00
OPCION 4 SUPERFICIAL				
2	CONCRETO POBRE (OPCIONAL)	288	\$ 22,000.00	\$ 6,336,000.00
3	PLACA DE CONTRAPISO EN MORTERO IMPERMEABILIZADO	34.56	\$ 490,000.00	\$ 16,934,400.00
4	MURO EN LADRILLO TOLETE	82	\$ 25,000.00	\$ 2,050,000.00
5	PAÑETE IMPERMEABILIZADO	82	\$ 13,800.00	\$ 1,131,600.00
6	MALLA ELECTROSOLDADA 4MM	21	\$ 131,000.00	\$ 2,751,000.00
				\$ 29,203,000.00

ANEXO 6

Estimación del costo de inversión adicionales para el fotobiorreactor

Sistema	Equipo	Fuente
Montaje del Fotobiorreactor Raceway	Compresor de CO ₂	[121][121]
	Material de protección de la superficie	[122][122]
	Malla de poliéster 136cm	[123][123]
	Molino de paletas =4,63m 30cm/s	[124][124]

ANEXO 7

Estimación de gastos extras

Equipo	Gastos Extra	Fuente
Servicios públicos	Agua	[125][125]
	Electricidad	[126][126]

ANEXO 8

Recomendaciones

Debido a la naturaleza teórica del presente proyecto, se considera necesario hacer diferentes proyectos experimentales para su ejecución. No solo para estimaciones con un menor índice de error sino también para optimizar.

Se recomienda evaluar el posible [107] uso del agua residual, obtenida de los procesos de concentración de biomasa, para mezclarla con el estiércol que entra al biodigestor en un inicio. De esta forma, aumenta la producción de biogás haciendo así más eficiente el proceso. Puede ser incluso posible, añadir otro tipo de residuos orgánicos, ya sea de la misma finca o de sus alrededores.

Otra manera de aumentar la producción de biogás se ha logrado ubicando botellas PET dentro del biodigestor tubular. Esto se debe a que las bacterias se sujetan a las paredes del biodigestor y el tener botellas PET permite que aumentar el área superficial al que se pueden agarrar estos microorganismos. También, el poner un agitador manual que permita desde afuera homogenizar el sustrato que se encuentra dentro del biodigestor. [39]

De igual forma, el uso de microalgas para el tratamiento de aguas es un paso común en sistemas PTAR. Teniendo la problemática de la Laguna de Fúquene, es posible asociar la recuperación de la laguna con el fotobiorreactor diseñado. Para esto se recomienda evaluar si, en este caso es posible, seguir alimentando al ganado con la biomasa residual o si es necesario reestructurar todo el proceso.

Por otro lado, hay que tener en consideración el diseño de tuberías pues, es posible la condensación de agua en la corriente de gases de combustión por sus cambios drásticos de temperatura. Entonces, es necesario incluir bolsillos que impidan que el agua se acumule en las tuberías e impida o afecte la inyección del CO₂ en el tanque de canalización.

También, hay que tener en cuenta que se asumió una combustión completa del biogás. Fue por esto que se diseñó con un exceso de aire. Sin embargo, al ser ideal esta

consideración, hay que considerar la posible presencia de CO en los gases de combustión. A pesar de esto, se sabe que el monóxido de carbono no afecta a las microalgas por su baja solubilidad en el agua.[108]

Además, se tuvo en cuenta en los costos la cantidad de agua necesaria para renovar lo que entra al fotobiorreactor sin considerar la reutilización del agua obtenida al purificar la Spirulina. Es necesario hacer un análisis del tema teniendo en cuenta como factor principal el que la recirculación no afecte el crecimiento de la Spirulina en el fotobiorreactor.

Finalmente, debido a la naturaleza teórica del presente proyecto, se recomienda que se hagan las correspondientes caracterizaciones, análisis, cálculos, entre otros, de forma experimental. Esto principalmente para tener datos exactos y disminuir posibles errores en su ejecución.