



**Diseño de un biodigestor para el aprovechamiento del desecho lactosuero en la
empresa Delilácteos San Martín**

Cesar Mauricio Correa Rincón
21131517226

Universidad Antonio Nariño

Ingeniería electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2021

**Diseño de un biodigestor para el aprovechamiento del desecho lactosuero en la
empresa Delilácteos San Martín**

Cesar Mauricio Correa Rincón

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero electromecánico

Director (a):

Doctor, Carlos Ramon Batista Rodríguez

Línea de Investigación:

Tecnologías para el aprovechamiento de las fuentes de energías renovables

Universidad Antonio Nariño

Ingeniería electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Contenido

| | Pág. |
|---|-----------|
| Resumen..... | 6 |
| Abstract..... | 7 |
| Introducción | 8 |
| Capítulo 1. Marco referencial para el diseño del biodigestor | 11 |
| 1.1 Las empresas de lácteos a nivel nacional | 11 |
| 1.2 Localización | 12 |
| 1.3 Marco regulatorio en el país | 13 |
| 1.4 Lactosuero y sus características | 14 |
| 1.4.1 Componentes del suero y la leche | 16 |
| 1.5 Digestión anaerobia del lactosuero | 16 |
| 1.5.1 Nutrientes para la digestión anaerobia..... | 19 |
| 1.6 Biodigestores usados en la industria láctea | 20 |
| 1.6.1 Tecnología de los biodigestores | 21 |
| 1.6.1.1 Biodigestor de tipo UASB | 21 |
| 1.6.1.2 Biodigestor de tipo CSTR | 23 |
| 1.6.1.3 Biodigestor de tipo UAF | 23 |
| 1.7 Origen del biogás | 25 |
| 1.7.1 Composición del biogás..... | 25 |
| 1.7.2 Purificación del biogás. | 26 |
| 1.7.3 Burbujeo de agua | 27 |
| 1.7.4 Absorción química..... | 27 |
| 1.7.5 Separación del vapor de agua | 28 |
| 1.8 Producción de biogás a base de suero | 28 |
| 1.8.1 Europa..... | 29 |
| 1.8.2 Estados Unidos | 30 |
| 1.8.3 Latinoamérica | 30 |
| Capítulo 2. Desarrollo metodológico del biodigestor | 31 |
| 2.1 Tecnologías aplicadas a partir del suero | 31 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 2.1.1 | Aspectos para convertir el suero en biogás | 31 |
| 2.1.2 | Facilidades de la implementación del suero en la producción del biogás | 33 |
| 2.1.3 | Diseño planta de tratamiento para producción de biogás rico en hidrogeno..... | 33 |
| 2.1.4 | Industria láctea alimenta planta de biogás con suero de leche | 35 |
| 2.1.4.1 | Funcionamiento..... | 36 |
| 2.1.5 | Aprovechamiento energético de lactosueros y otros residuos en queserías | 36 |
| 2.1.6 | De residuo a biogás: aprovechamiento del suero lácteo..... | 37 |
| 2.1.7 | Conclusiones de estas investigaciones tecnológicas | 38 |
| 2.1.7.1 | Tecnología para empresas de lácteos | 39 |
| 2.2 | Características generales de la empresa Delilácteos san martín | 39 |
| 2.2.1 | Servicios básicos disponibles: | 40 |
| 2.2.2 | Proveedores de materia prima | 40 |
| 2.2.3 | Diagrama de volumen y masa | 41 |
| 2.3 | Demanda energética de la empresa | 43 |
| 2.3.1 | Necesidades energéticas de la empresa | 43 |
| 2.4 | Información necesaria para el diseño y cálculos del biodigestor | 43 |
| 2.4.1 | Cantidad de suero generado..... | 43 |
| 2.4.2 | Datos importantes | 44 |
| 2.4.3 | Ubicación del biodigestor | 46 |
| 2.4.4 | Tiempo de Retención Hidráulica y Tasa de Carga Orgánica | 47 |
| 2.5 | Criterios para realizar el diseño..... | 48 |
| 2.5.1 | Tipo de biodigestor | 48 |
| 2.5.1.1 | Biodigestor semicontinuo..... | 49 |
| 2.5.2 | Temperatura para su operación..... | 49 |
| 2.5.3 | Válvulas de seguridad..... | 50 |
| 2.6 | Diseño del biodigestor..... | 51 |
| 2.6.1 | Dimensionamiento del biodigestor..... | 51 |
| 2.7 | Ecuaciones de diseño y dimensionamiento del biodigestor | 52 |
| 2.7.1 | Volumen del tanque de alimentación. | 52 |
| 2.7.2 | Volumen de sustrato. | 53 |
| 2.7.3 | Volumen cúpula de gas..... | 55 |
| 2.7.4 | Volumen total del biodigestor | 55 |
| 2.7.5 | Volumen dispositivo de descarga | 56 |
| 2.7.6 | Producción de biogás..... | 56 |
| 2.7.7 | Filtro de ácido sulfúrico..... | 57 |
| 2.7.8 | Reserva de gas | 58 |
| 2.8 | Generador Diesel..... | 59 |
| 2.9 | Análisis de datos de la empresa..... | 61 |
| 2.9.1 | Consumo eléctrico empresa..... | 62 |
| 2.9.2 | Requerimientos de diseño..... | 65 |
| 2.9.3 | Ubicación del biodigestor | 66 |
| 2.9.4 | Biodigestor..... | 66 |
| 2.9.5 | Requerimientos del biodigestor | 67 |
| 2.9.6 | Especificaciones del tanque biodigestor..... | 68 |
| 2.9.7 | Diseño del biodigestor | 69 |
| Capítulo 3. Evaluación técnico-económica del biodigestor | | 70 |

| | | |
|-------|--|-----------|
| 3.1 | Estudio de factibilidad..... | 70 |
| 3.1.1 | Estudio de Mercado | 70 |
| 3.2 | Financiero..... | 71 |
| 3.2.1 | Inversión inicial | 72 |
| 3.2.2 | Flujo de caja..... | 73 |
| 3.2.3 | Indicadores financieros..... | 73 |
| 3.2.4 | Consolidado flujo de caja | 75 |
| 3.2.5 | Punto de equilibrio..... | 76 |
| | Conclusiones | 79 |
| | Recomendaciones | 80 |
| | Referencias Bibliográficas..... | 81 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1 – 1. Mapa del sector lácteo colombiano. | 12 |
| Figura 1 - 2. Composición del suero..... | 16 |
| Figura 1 - 3. Proceso de digestión anaerobia. | 19 |
| Figura 1 - 4. Proceso de digestión anaerobia UASB. | 22 |
| Figura 1 - 5. Proceso de digestión anaerobia CSTR. | 23 |
| Figura 1 - 6. Proceso de digestión anaerobia UAF. | 24 |
| Figura 1 - 7. Filtro reducción de dióxido de carbono | 28 |
| Figura 1 - 8. Generador de electricidad con biogás | 30 |
| Figura 2 - 9. Proyecto asesorado por viogaz..... | 32 |
| Figura 2 - 10. Tanque Reactor de Mezcla de Flujo Continuo..... | 35 |
| Figura 2 - 11. Instalación experimental | 36 |
| Figura 2 - 12. Lactosuero como fuente de energía..... | 38 |
| Figura 2 - 13. Ubicación de la empresa. | 39 |
| Figura 2 - 14. Promedio generación lactosuero | 41 |
| Figura 2 - 15. Diagrama volumen y grasa..... | 42 |
| Figura 2 - 16. Esquema de los residuos | 44 |
| Figura 2 - 17. Válvula de seguridad..... | 50 |
| Figura 2 - 18. Esquema planta de biogás | 51 |
| Figura 2 - 19. Generador eléctrico Preston. | 59 |
| Figura 2 - 20. Gráfica de comportamiento del consumo de energía diaria..... | 64 |
| Figura 2 - 21. Promedio generación lactosuero | 65 |
| Figura 2 - 22. Distribución de la empresa..... | 66 |
| Figura 2 - 23. Diseño biodigestor AutoCAD..... | 69 |
| Figura 3 - 24. Punto de equilibrio | 77 |
| Ilustración 3 - 25. Costos e ingresos unitarios | 77 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1 - 1. Producción de leche diaria 2018..... | 13 |
| Tabla 1 - 2. Componentes del suero dulce y ácido. | 15 |
| Tabla 1 - 3. Proyectos de biogás reportados en Colombia..... | 17 |
| Tabla 1 - 4. Comparación digestión anaeróbica de biodigestores para el lactosuero. | 25 |
| Tabla 1 - 5. Componentes del biogás..... | 25 |
| Tabla 1 - 6. Características del biogás. | 26 |
| Tabla 1 - 7. Variedad de la mezcla del dióxido de carbono en su temperatura y presión .. | 27 |
| Tabla 1 - 8. Proyectos Empresa Valbio | 29 |
| Tabla 2 - 9. Clasificación de las mezclas utilizadas..... | 37 |
| Tabla 2 - 10. Suero generado día | 40 |
| Tabla 2 - 11. Promedio lactosuero | 41 |
| Tabla 2 - 12. Equivalencias energéticas..... | 44 |
| Tabla 2 - 13. Características del biogás comparado con otros gases. | 45 |
| Tabla 2 - 14. Poder calorífico | 46 |
| Tabla 2 - 15. Tasa de carga orgánica. | 47 |
| Tabla 2 - 16. Rango de ponderación | 48 |
| Tabla 2 - 17. Datos importantes para el dimensionamiento del biodigestor..... | 52 |
| Tabla 2 - 18. Capacidad almacenamiento de suero generada. | 53 |
| Tabla 2 - 19. Características técnicas del generador..... | 59 |
| Tabla 2 - 20. Principales características del motor. | 60 |
| Tabla 2 - 21. Datos del generador. | 60 |
| Tabla 2 - 22. Consumo de energía eléctrica de la planta. | 62 |
| Tabla 2 - 23. Consumo promedio de energía eléctrica. | 62 |
| Tabla 2 - 24. Promedio kWh consumido | 63 |
| Tabla 2 - 25. Consumo y valor de energía anual | 63 |
| Tabla 2 - 26. Producción estimada biogás | 64 |
| Tabla 2 - 27. Producción de suero promedio | 65 |
| Tabla 2 - 28. Características biodigestores chino e hindú | 67 |
| Tabla 2 - 29. Resultados obtenidos para el diseño..... | 67 |
| Tabla 2 - 30. Especificaciones del tanque del biodigestor..... | 68 |
| Tabla 3 - 31. Costos de la inversión y diseño. | 72 |
| Tabla 3 - 32. Flujo de caja | 73 |
| Tabla 3 - 33. Datos formulados..... | 74 |
| Tabla 3 - 34. Plantilla flujo de caja..... | 76 |

Lista de ecuaciones

| | |
|--|----|
| Ecuación 1. Volumen tanque alimentación..... | 52 |
| Ecuación 2. Volumen sustrato. | 53 |
| Ecuación 3. Volumen alimentación al biodigestor. | 54 |
| Ecuación 4. Volumen de sustrato alimentado al biodigestor | 54 |
| Ecuación 5. Volumen de cupula | 55 |
| Ecuación 6. Volumen Total del Biodigestor | 55 |
| Ecuación 7. Volumen dispositivo descarga | 56 |
| Ecuación 8. Producción de biogás. | 56 |
| Ecuación 9. Acido sulfúrico..... | 57 |
| Ecuación 10. Cálculo de moles | 57 |
| Ecuación 11. Hierro requerido | 58 |
| Ecuación 12. Volumen reserva de gas | 58 |
| Ecuación 13. Cálculo de la Energía generada..... | 61 |
| Ecuación 14. Volumen de tanque biodigestor requerido | 68 |
| Ecuación 15. Valor Presente Neto - VPN | 73 |

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Compuestos químicos

| Símbolo | Nombre | Formula |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| <i>CH₄</i> | Metano | <i>CH₄</i> |
| <i>CO₂</i> | Dióxido de carbono | <i>CO₂</i> |
| <i>NO_x</i> | Óxidos de nitrógeno | <i>NO_x</i> |
| SO | Óxidos de azufre | SO |
| CO | Monóxido de carbono | CO |
| <i>H₂</i> | Hidrógeno | <i>H₂</i> |
| <i>H₂S</i> | Ácido sulfhídrico | <i>H₂S</i> |

Unidades de volumen

| Símbolo | Nombre | Equivalencia |
|------------------------|------------------------|---|
| <i>m³/L</i> | Metro cúbico por litro | 1 m ³ = 1.000 L |
| <i>mg/L</i> | Miligramo por litro | Miligramos por litro |
| <i>L/ton</i> | Litro sobre tonelada | 1.10231131x10 ⁻⁶ m ³ / kg |

Unidades de energía y potencia

| Símbolo | Nombre | Equivalencia |
|-----------|-----------|--------------|
| <i>kW</i> | Kilovatio | 1000 W |
| <i>MW</i> | Megavatio | 1.000.000 W |

Abreviatura Término

| | |
|------------|------------------------------|
| <i>DBO</i> | Demanda biológica de oxígeno |
| <i>DQO</i> | Demanda química de oxígeno |
| <i>GEI</i> | Gases de efecto invernadero |

Quiero primero que todo agradecer a Dios, por el apoyo espiritual que me brinda en mi camino.

A mi familia: mi madre, hermana, esposa e hijo, que fueron mi aliento, apoyo incondicional de seguir adelante pese a los obstáculos que se presentaban a lo largo de la carrera; son las personas que siempre están conmigo, me aportaron sus conocimientos y experiencias, me enseñaron que con dedicación y constancia se pueden realizar todos los proyectos que uno emprende en la vida

Agradecimientos

A esta gran institución como es la Universidad Antonio Nariño, gracias a nuestros docentes por su dedicación, constancia y su buena orientación que transmitieron todos sus conocimientos y valores que se adquirieron en el transcurso de este gran camino.

A mi tutor, el Doctor Carlos Ramón Batista, persona que con sus consejos me orientó y me guio en mi proyecto, con gran colaboración y disponibilidad me dedicó lo más importante que es el tiempo, en este proceso de realizar el trabajo para llegar hasta el éxito.

Resumen

La industria láctea como subproducto del proceso de elaboración del queso genera lactosuero, que presenta gran contenido de materia orgánica en forma de lactosa, proteínas y otros compuestos procedentes de la leche. Su incontrolado manejo ocasiona problemas de contaminación, con grave impacto sobre el ecosistema. La recuperación de componentes del lactosuero permitiría dar un valor agregado al subproducto, al encontrar aplicaciones en la industria alimentaria y farmacéutica. Convertir ese desecho en un biocombustible, como fuente potencial de energía renovable, le daría un papel importante dentro de los posibles sucesores de los combustibles tradicionales fósiles. La opción de tratar el lactosuero a partir del beneficio energético que puede ofrecer ha adquirido gran interés durante los últimos años. Este proyecto, con el fin proponer una alternativa para mitigar los impactos negativos de las empresas productoras de lácteos, realiza un diseño para determinar la viabilidad de una planta de biodigestión anaeróbica con capacidad para generar 21 m³ de biogás en 10 días promedio, utilizando residuos del suero que desecha la empresa Delilácteos San Martín con el fin de ser aprovechados para la generación de energía eléctrica. Se decidió diseñar el dispositivo de biodigestión y almacenamiento en tanques de PVC. Se realizan los planos en el software AutoCad con dimensionamiento específico de los cálculos obtenidos. El presente estudio apunta a la necesidad según su factibilidad técnico-económica en su construcción, así como la implementación de alternativas técnicas para generación y abastecimiento energético, con posibilidades de aplicación en regiones de producción quesera y derivados, como Boyacá.

PALABRAS CLAVES: Biodigestor, biogás, biomasa, energía eléctrica, generador, lactosuero.

Abstract

The dairy industry, as a by-product of the cheese-making process, generates whey, which has a high content of organic matter in the form of lactose, proteins and other compounds from milk. Its uncontrolled management causes pollution problems, with serious impact on the ecosystem. The recovery of whey components would allow adding value to the by-product, finding applications in the food and pharmaceutical industry. Converting this waste into a biofuel, as a potential source of renewable energy, would give it an important role within the possible successors of traditional fossil fuels. The option of treating whey based on the energy benefit it can offer has gained great interest in recent years. This project, in order to propose an alternative to mitigate the negative impacts of dairy producing companies, carries out a design to determine the viability of an anaerobic biodigestion plant with the capacity to generate 21 m³ of biogas in an average 10 days, using waste from the Serum that the Delilacteos San Martin company discards in order to be used for the generation of electrical energy. It was decided to design the device for biodigestion and storage in PVC tanks. The plans are made in the AutoCad software with specific dimensioning of the obtained calculations. This study points to the need according to its technical-economic feasibility in its construction, as well as the implementation of technical alternatives for generation and energy supply, with possibilities of application in regions of cheese production and derivatives, such as Boyacá.

KEY WORDS: Biodigester, biogas, biomass, electrical energy, generator, whey.

Introducción

La empresa Delilácteos san martín ubicada en el municipio de Tuta Boyacá, se dedica a la producción de diferentes productos lácteos, en la cual genera alrededor de 1006 litros de suero al día de los cuales un 30% son utilizados para la alimentación animal y el resto es regado en pastales aledaños de la planta ocasionando una gran problemática ambiental.

En Industria alimentaria estas son el pilar de varios sectores económicos, donde se puede observar que las empresas lácteas abarcan un porcentaje alto de esta actividad. En este se elaboran productos y subproductos derivados de la leche, con producciones que sobrepasan los 22 millones de toneladas al año [1].

En la elaboración de quesos se produce el suero como un residuo líquido que se extrae de la leche, dejando proteínas las cuales tienen un volumen del 80 – 90% en totalidad la leche es emplea en este proceso. Tiene una composición del 50% de nutrientes [2], en este proceso se produce una separación del suero y la cuajada, en la cual se obtiene el residuo del desecho de las industrias queseras. La generación de suero en las empresas de lácteos hace que se le convierta en un problema constante a estos sitios, ya que generan que los suelos y ríos sufran pérdida de nutrientes y gran contaminación en su ecosistema. Al desechar este producto se altera químicamente el lugar con una acidez que perjudica o altera ese entorno natural [3].

Actualmente, la industria de lácteos artesanales han tenido una mala tradición en el manejo de los desechos derivados de la leche, los cuales son vertidos en ríos y suelos, afectando y alterando el medio ambiente [4].

Por lo anterior, es de considerar la realización de un diseño de una planta para el tratamiento del suero lácteo y la generación de biogás para satisfacer las necesidades de energía eléctrica de la empresa contribuyendo con la disminución de la contaminación ambiental. Para lograr este objetivo se establece el consumo energético de la plata, se realizó una determinación experimental del lactosuero para conocer cómo se puede utilizarse el contenido de carbono de sus componentes para la obtención de biogás. Así como la aplicación de las ecuaciones que determinaron la cantidad de biogás que se obtendría en el proceso anaeróbico y la selección adecuada del biodigestor y así la evolución de costos para su construcción.

Biodigestores en Colombia

Manuelita S.A es una de las empresas nacionales que implementó nuevas tecnologías aprovechando el biogás como fuente de energía. Con base en el uso de biocombustibles implantaron un sistema que permite obtener este biogás. Utilizan un diseño de dos lagunas

anaeróbicas que permiten capturar un promedio de 5.000.000 m³/año, con los cuales por medio de generadores se obtiene electricidad a partir del biogás.

Estas lagunas están impermeabilizadas para proteger el suelo y los acuíferos, eliminando emisiones a la atmósfera, siendo consientes con nuestro planeta y reduciendo el uso de combustibles convencionales fósiles [5].

El año 2015, Colombia firmó el Acuerdo de París [6]. El mismo expone que en el mundo se deben promover diferentes fuentes de energías renovables, e ir disminuyendo la contaminación resultante de los combustibles fósiles, como petróleo, gas natural o carbón. En Colombia, estas energías han tenido una gran aceptación que va aumentando considerablemente y obteniéndose han logrado importantes compromisos, como la generación de biomasa a partir de diferentes desechos.

Colombia cuenta con una gran variedad de fuentes para ejecutar e implementar nuevas alternativas para desarrollar estos proyectos. Con la generación a partir de la biomasa se han venido desarrollando ideas innovadoras por la demanda de los mercados y las respectivas energías que sean renovables. Como marco potenciador, en el año 2014 se aprueba la Ley 1715 [7], la cual contempla beneficios tributarios a las empresas que realicen o implementen nuevas alternativas que ayuden al mejoramiento del medio ambiente. Así el país se convierte en un referente para una nueva implementación de las nuevas energías renovables.

Según datos de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) [8], ha aumentado exponencialmente la cantidad de iniciativas que se han radicado, en las cuales la generación térmica se realiza mediante el aprovechamiento de desechos orgánicos. Este tipo de tecnología ha tenido un crecimiento en los últimos años, según cifras registradas por la UPME [8].

El lactosuero se convierte en un sustrato valioso energéticamente por medio de ciertos pasos biológicos de fermentaciones. Cuenta con un alto contenido de lactosa y a su vez un alto contenido de materia orgánica. Las alternativas de tratamiento dispuestas en las diferentes fases y los microorganismos utilizados se pueden emplear en procesos de fermentación para obtener etanol, la digestión anaerobia para producir biogás, la fermentación oscura para obtener hidrógeno o la combinación de las dos etapas para obtener hidrógeno y biogás [9].

Estudios de Erguder [10] y Mawson [11], respectivamente, han reportado en estudios en los cuales se produjo de 20 a 35 m³ de biogás, por cada 1.000 litros de suero, los cuales se utilizaron digestores de flujo ascendente. La demanda de fuentes de energía convencional como los combustibles fósiles, ha obligado a través de políticas públicas a muchos países a implementar medidas e incrementar nuevas ideas tecnológicas, estimulando a los sectores industriales con incentivos tributarios, en este sentido la industria láctea puede verse atraída por estos beneficios.

Se estima que el procesamiento de 200.000 litros de leche, representa tratar 60.000 litros para la producción de quesos, que dejan libres cerca de 44.000 litros de suero, teniendo en cuenta que este es aproximadamente el 90% de volumen de leche, y considerando que la generación de energía es de 2 kWh/m³ de biogás con 70% de metano” [12].

Alcance

Realizar el diseño de un biodigestor para la empresa Delilácteos San Martín, el cual garantizará el manejo adecuado de residuos del lactosuero, y el diseño del dispositivo de almacenamiento, proyectando un estudio de cálculos para que el diseño sea exitoso y pueda ser implementado por la empresa y garantizar la producción de metano para el posterior aprovechamiento y transformación en energía eléctrica a través de un generador. La implementación de este proyecto queda a disposición de la empresa Delilácteos San Martín.

- Objetivos

Objetivo general

Diseñar un biodigestor para el aprovechamiento del lactosuero de la empresa Delilácteos San Martín

- Objetivos específicos

- Investigar las tecnologías para el aprovechamiento del metano contenido en el biogás.
- Diseñar un dispositivo de almacenamiento del gas producido en el biodigestor.
- Diseñar un biodigestor que satisfaga los requerimientos necesarios para el aprovechamiento del lactosuero.
- Evaluar la factibilidad técnico-económica de su construcción.

Capítulo 1. Marco referencial para el diseño del biodigestor

El presente diseño se desarrolló para la empresa Delilácteos San Martín, una empresa enfocada en la producción de lácteos, fundada hace 30 años en el sector de San Martín, que tiene como objetivo la implementación de una alternativa para el tratamiento de residuo como el lactosuero y la transformación o aprovechamiento de este como fuente de energía renovable.

La empresa Delilácteos San Martín inició operaciones en el año 1985 en Tuta, Boyacá, con un empleado su esposa y su fundador el señor Saul Suárez, al pasar los años, los propietarios se trasladan a Combita Boyacá, zona de lechera donde se establecen y construyen la fábrica. Hoy en día, la empresa utiliza alrededor de 1320 litros diarios de leche en la transformación de quesos doble crema, pera, campesino y derivados. Esa producción genera diariamente alrededor de 1006 litros de lactosuero, de los cuales 100 litros son dispuestos para alimentación de cerdos y el restante es desechado, sin tratamiento o aprovechamiento alguno.

1.1 Las empresas de lácteos a nivel nacional

Según cifras, en la nación de Colombia cerca de 500 mil productores recolectan alrededor de 7 mil millones anuales de leche, cifra que refleja menos del 1% mundial [13]. El Ministerio de Agricultura indica que la industria láctea en Colombia tiene la participación de casi un cuarto (25.2%) del PIB agropecuario [14], representando el 1.6% del PIB a nivel nacional. En 2018, las utilidades de la leche tuvieron un incremento del 12% respecto a cifras del año anterior, obteniendo una mejora el sector lácteo en sus procesos productivos con la implementación de nuevas tecnologías en la ejecución productiva.

Este sector lácteo, comenzando en el nivel del productor hasta la industrial, enfrenta enormes retos en materia de productividad, se debe fortalecer ya que presenta una necesidad la cual debe implementar nuevos modelos más eficaces que permitan el aumento de producción del sector lechero por día, ayudar en la tecnificación de centros de acopio, fincas de recolección, suelos más fértiles que proporcionen un buen estado para el pastoreo, y la automatización de procesos agropecuarios que estén a la vanguardia.

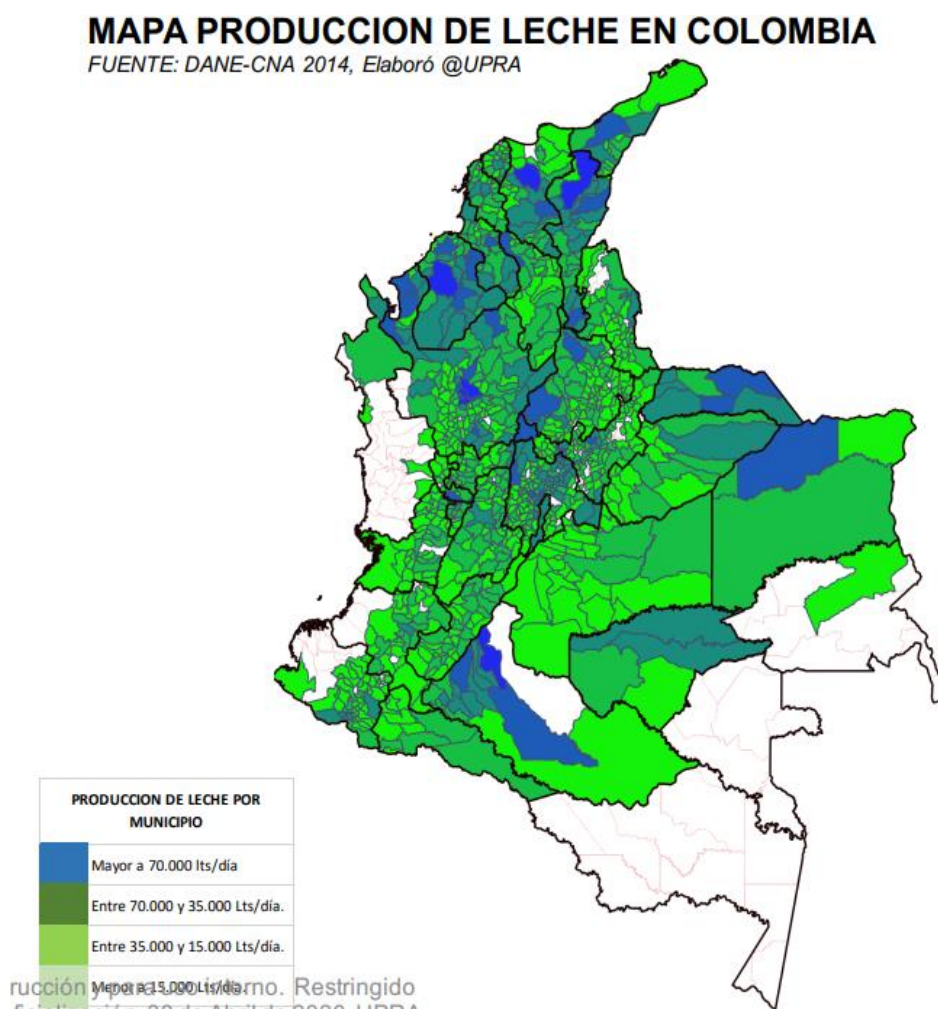
En Colombia uno de los proyectos más importantes está ubicado en ciudad Bolívar en Bogotá, pertenece al relleno sanitario Doña Juana el cual es uno de los cuatro más grandes a nivel mundial en disminución de emisiones de gases de efecto invernadero. Este reduce anualmente más de 700 mil toneladas de dióxido de carbono, lo que equivale a emisiones generadas en un período de un año por 158 mil vehículos que recorren alrededor de 40 kilómetros o la captación de dióxido de carbono de 117 millones de árboles anualmente. Actualmente con este proyecto se están generando alrededor de 650 kWh de energía

eléctrica, la cual es utilizada en la planta de tratamiento, la cual se tiene un estimado en reducir unos 15 millones de toneladas de dióxido de carbono [15].

1.2 Localización

Según informa de cifras del MinAgricultura [14], en la Figura 1-1 se ilustran las principales zonas productoras de leche del país, en miles de litros. Los datos de producción diaria en los departamentos que más aportaron al total se muestran en la Tabla 1-1.

Figura 1 – 1. Mapa del sector lácteo colombiano.



Fuente: Ministerio de Agricultura de Colombia [14].

Estos datos reflejan el mercado que actualmente está presentado este sector, donde genera una brecha en la competencia frente a otros países. Desafíos como tratados de libre comercio impactan los precios, la industria no está preparada tecnológicamente para generar una alta productividad y poder competir globalmente. La industria colombiana lechera ver tabla 1-1, debe apostarle a tecnificarse y mejorar efectivamente su productividad [14].

Tabla 1 - 1. Producción de leche diaria 2018.

| Producción de Leche diaria por Departamento 2018 | | | |
|---|---------------------|--------------------------|------------------------|
| # | Departamento | Volumen/Día/Litro | Participación % |
| 1 | Antioquia | 3,826,139 | 19% |
| 2 | Cundinamarca | 3,014,402 | 15% |
| 3 | Córdoba | 1,373,543 | 7% |
| 4 | Boyacá | 1,207,998 | 6% |
| 5 | Magdalena | 946,963 | 5% |
| 6 | Cesar | 923,623 | 5% |
| 7 | Nariño | 825,459 | 4% |
| 8 | Meta | 813,830 | 4% |
| 9 | Santander | 651,600 | 3% |
| 10 | Sucre | 628,389 | 3% |
| Otros Departamentos | | 5,947,068 | 30% |
| Total | | 20,159,014 | 100% |

Fuente: Tabla sector lácteo colombiano. MinAgricultur

1.3 Marco regulatorio en el país

En lo concerniente a la normatividad del uso nuevas energías e incentivos, se tienen las siguientes:

A) **Decreto 3683 de 2003**

En este decreto indica el uso racional y eficiente de energía donde se debe tener una mayor eficiencia energética la cual asegure un abastecimiento energético continuo y que sea oportuno, con esto generando que exista una competitividad en el mercado Colombiano, protegiendo al consumidor y el promover fuentes que no convencionales de energía, que estén dentro del marco del desarrollo sostenible y manteniendo las normas vigentes aplicadas al medio ambiente, ecosistemas y recursos naturales que sean renovables [16].

B) **Decreto 2469 de 2014**

En este decreto se establece un lineamiento político energético de materia de la entrega de autogeneración, donde la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) es la encargada de regular esta actividad de autogeneración que se implementa en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) en la regulación 024 del 2015 [17].

C) **Ley 1715 de 2014**

En esta ley el objetivo es promover los nuevos desarrollos e implementaciones de fuentes no convencionales de energías renovables que sean aplicables en el sistema energético nacional, participación de zonas en las cuales no estén interconectadas aplicaciones a otros usos energéticos que permitan el desarrollo económico que sea sostenible, disminuyendo

emisiones de gases de efecto invernadero, a esto también se le incluye el aprovechamiento de la biomasa producto de desechos agrícolas, residuos orgánicos y cultivos [18].

D) Decreto 1623 de 2015

Este decreto indica la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica del sistema interconectado nacional y en lugares que no estén interconectados [19].

E) Resolución UPME 045 de 2016

Esta resolución dice que los procedimientos permiten la certificación a proyectos Fuentes No Convencionales de Energía (FNCER) para acceder a incentivos tributarios de la Ley 1715 [20].

F) Resolución CREG 030-2018

Su objetivo es regular todos los aspectos operativos y comerciales los cuales permite la integración de autogeneración a pequeña escala y la generación distribuida por parte de la SIN, para los autogeneradores de una pequeña escala, menores o iguales a 5 MW y a gran escala mayores a 1 MW, generadores distribuidos y comercializadores que los operan así como a los trasmisores nacionales [21].

G) Resolución 631 de 2015

En el Capítulo VI, Artículo 12 se hace relación a este efluente como agua residual no doméstica. Según la norma, este residuo debe cumplir con algunos parámetros fisicoquímicos, para que el vertimiento de estos residuos en cuerpos de aguas superficiales o alcantarillados se realice de forma legal procurando la mitigación y reducción del impacto eco ambiental se la zona donde se realice el proceso [22].

H) PEN 2020 – 2050

El Plan Energético Nacional (PEN), busca diversidad de formas de ampliar la demanda energética del país, realizando un estudio de proyecciones en transporte, residencial e industria hacia el año 2050 con el fin de desarrollar diversidad de energía limpia, implementando fuentes renovables como solar, biomasa, eólica que se integrando el medio ambiente y tecnologías, con esto busca también incentivos tributarios, contables y aranceles para el desarrollo de aquellas nuevas fuentes de energía renovables [23].

1.4 Lactosuero y sus características

El lactosuero es una sustancia líquida se obtiene en la separación cuando se coagula la leche en la etapa del proceso del queso. Este líquido traslúcido verdoso que se obtiene de la precipitación de caseína. Tiene alto contenido de nutrientes, lactosa, vitaminas, minerales y grasa. El tipo de lactosuero depende de la composición y eliminación de caseína. Varía

según el tipo de leche que se emplee a la hora de elaborar productos como el queso, también por la forma como se ejecute este proceso de elaboración [24].

Existen diferentes características de lactosuero, estas dependen de la separación de la caseína, el primero es de tipo dulce, el cual se basa principalmente en la coagulación por la renina que cataliza la rotura de la leche desequilibrando la proteína precipitando la formación de cuajada. El segundo es un ácido que resulta de la fermentación cuando se adiciona ácidos o minerales los cuales coagulan la caseína como en el proceso de fabricación de quesos frescos [24], ver Tabla 1-2.

Según [24], en cualquiera de estas dos características del proceso este residuo se estima que por cada kilogramo de queso se obtienen 9 kg de suero, equivalentes al 85-90% del volumen total de leche.

Tabla 1 - 2. Componentes del suero dulce y ácido.

| COMPONENTE | LACTOSUERO DULCE (g/L) | LACTOSUERO ACIDO (g/L) |
|-----------------|------------------------|------------------------|
| Solidos totales | 63 – 70 | 63 – 70 |
| Lactosa | 46 – 52 | 44 – 46 |
| Proteína | 6.0 – 10 | 6.0 – 8.0 |
| Calcio | 0.4 – 0.6 | 1.2 – 1.6 |
| Fosfatos | 1.0 – 3.0 | 2.0 – 4.5 |
| Lactato | 2.0 | 6.4 |
| Cloruros | 1.1 | 1.1 |

Fuente: importancia en la industria de alimentos [25].

El lactosuero debe tener unos parámetros de composición y de cuidado en el proceso de elaboración de productos lácteos y todos sus ingredientes necesarios en el proceso. En el proceso la leche debe ser de una calidad, y se le debe dar un buen manejo y una excelente limpieza en la fabricación del producto determinando parámetros del lactosuero, estas características de su composición del suero son las siguientes:

- Calidad de la leche.
- Etapas en las que se elabora el queso, tratamientos de temperatura, cloruros de calcio, cultivos bacterianos y coagulación utilizada.

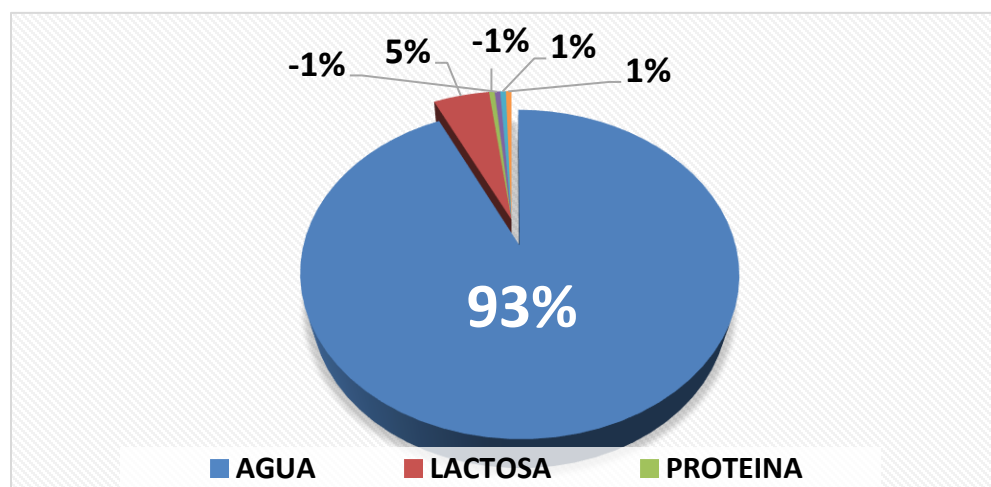
1.4.1 Componentes del suero y la leche

El suero de la leche, según [25], poseen alrededor de un 90% de volumen total de leche, y gran parte de estos compuestos son hidrosolubles, esta se componen del 95% de la lactosa que es azúcar, un 25% de proteínas y un 8% que constituye grasas.

La estructura de este residuo puede variar según el proceso del producto fabricado, pero en forma general este contiene aproximadamente un 93% de agua, 5% de lactosa, 0.5% de proteína cruda, 0.5% de minerales, 0.5% de grasa, 0.5% de ácido láctico y vitaminas que son hidrosolubles del proceso ver figura 1-2 [25].

Cerca del 70% de proteína se halla en el residuo del suero corresponde a proteínas que contienen una mayor parte de nutrientes al de la caseína, como los beta-lactoglobulina, alfa-lactoglobulina, inmunoglobulina, proteosa-peptonas y las enzimas. Existe un factor que es importante que depende de la acidez del suero, se puede clasificar en dulce si está en un rango de pH mayor a 8; medio ácido si se encuentra con pH entre 5.5 y 8; y ácido si su pH es inferior a 5, estos datos y referencias son determinadas [25].

Figura 1 - 2. Composición del suero



Fuente. Lactosuero: importancia en la industria de alimentos [25].

1.5 Digestión anaerobia del lactosuero

Actualmente el uso de biodigestores en Colombia ha tenido un lento desarrollo, por el bajo interés apoyo y políticas poco claras que ayuden a reglamentar el uso de esta tecnología. Proyectos a gran escala se han ejecutado a lo largo del territorio nacional, es el caso de la implementación por el auge de cultivo de palma y el tratamiento de afluentes líquidos producto de las máquinas extractoras de este aceite, las cuales han provocado que se implementen formas para tratar los residuos que se generan [26], ver Tabla 1-3.

Tabla 1 - 3. Proyectos de biogás reportados en Colombia.

| PROYECTO | DESCRIPCION | REF. |
|------------------------------|---|-------------------|
| Palmeras del llano | Planta de extracción de aceite de palma, Biodigestor hormigón, 750 m ³ de capacidad. Aplicación biogás para la generación de electricidad. Instalado en 1987. | Conil, 2009. |
| Palmar santa elena | Planta de extracción de aceite de palma. Biodigestor de hormigón, 500 m ³ de capacidad. Aplicación del biogás para la generación de electricidad. Instalado en 1991. | Conil, 2009. |
| Palmeiras | Planta de extracción de aceite de palma. Carpa cubierta laguna. 7.000 m ³ de capacidad. Aplicación del biogás para la generación de electricidad. Instalado en 1999. | Conil, 2009. |
| Cali | Proyecto MDL: Autogeneración de biogás como energía renovable en la planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralejo de EMCALI. | MDL, UNFCCC, 2009 |
| Cali | Proyecto MDL: Recuperación y combustión de metano en el tratamiento de lodos existentes en el sistema planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralejo de EMCALI. | MDL, UNFCCC, 2009 |
| Pasto | Proyecto MDL: Construcción, operación y mantenimiento del sistema de colección y quema de biogás en el relleno sanitario Antanas. | MDL, UNFCCC, 2009 |
| Puerto Leguizamo – Putumayo | Planta piloto de biogás para la generación de energía | MME, 2010 |
| San Carlos de Guaroa - Meta | Aceites manuelita, 2 biodigestores 19.000 m ³ , procesa 300.000 Ton/año de material, aplicación planta biodiesel. | Biotec, 2013 |
| Sabana de torres – Santander | Oro rojo, grupo indulpalma, biodigestor 16.000 m ³ , procesa 150.000 ton/año de materia, sin aplicación (tea) | Biotec, 2013 |

Fuente: Potencial de uso de biogás en Colombia [26].

La digestión anaeróbica consiste en degradar y estabilizar el material orgánico bajo ciertas condiciones anaeróbicas donde organismos microbianos realizan esta tarea. El proceso que se ejecuta consiste en emplear poblaciones de microorganismos simbióticos que utilizan un amplio espectro de sustratos que en ausencia del oxígeno convierten o sintetizan los productos finales.

Esta digestión que sucede la descomposición de materia orgánica se realiza en rangos de temperaturas termofílicas (extremas), mesofílicas (temperatura de crecimiento) y psicofílicas (temperatura por debajo 5°C). Este tipo de proceso tiene ventajas de generación de lodos, consumos de energía y produce una cantidad considerable de metano [27].

Las cuatro etapas bioquímicas presentes en la digestión anaeróbica del lactosuero son hidrólisis (reacción química), acidogénesis (especies bacteriana), acetogénesis (producción acetato) y metanogénesis (formación de metano).

Este proceso inicia con la hidrólisis de lípidos, carbohidratos (destacando la lactosa, biopolímero de mayor contenido en lactosuero) y proteínas. La acidogénesis da lugar a una fermentación de monosacáridos, se obtiene dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. Además, se obtiene lactato, propionato, acetato, butirato y etanol.

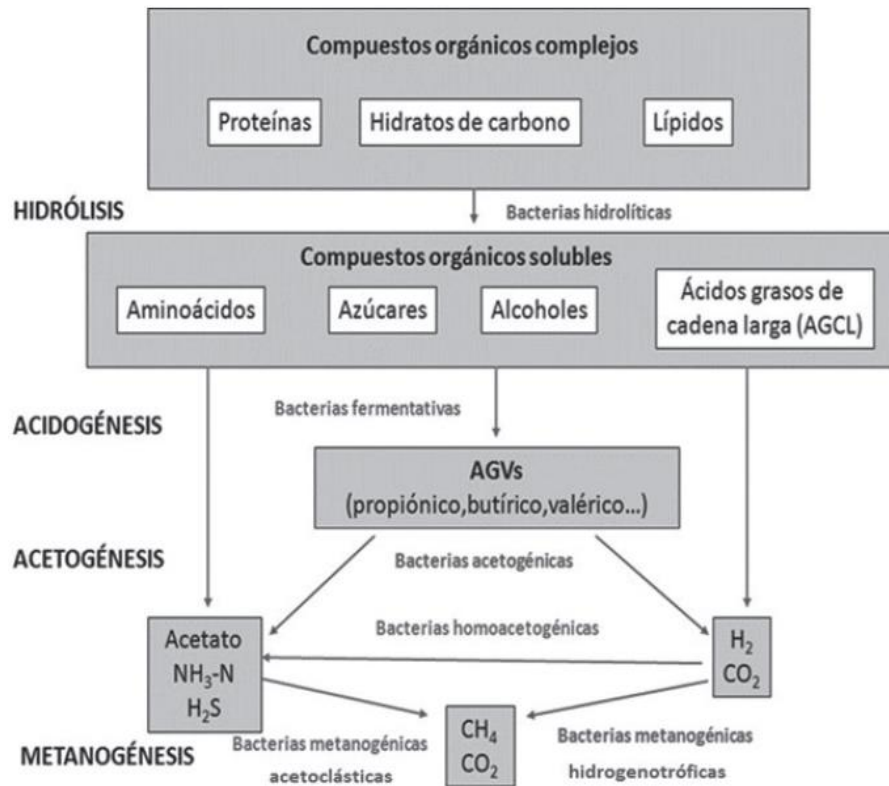
Las etapas de hidrólisis y de acidogénesis (ver Figura 1-3) en el proceso se realizan de forma simultánea. Posteriormente, la acetogénesis se divide en dos sentidos, la primera las bacterias acetogénicas que generan H_2 oxidan los ácidos grasos y también los alcoholes de acetato, produciendo dióxido de carbono.

En la segunda etapa, las bacterias acetogénicas producen dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno, generando una competencia con microorganismos de metanogénesis por el consumo del gas. Finalmente, las metanogénesis permiten la obtención final del metano. Estos microorganismos son anaeróbicos y en su mayoría mesófilos. Son de dos tipos hidrogenófilos, los cuales disminuyen dióxido de carbono, metano y acetoclasticas que hidrolizan el acetato que es producido en la acetogénesis, donde oxida una parte de carbonilo en dióxido de carbono y el grupo de metilo en metano. Aproximadamente, un 70% del metano se origina a partir del acetato y un 30% se produce del dióxido de carbono [28].

El ácido acético es el que influye en la cadena alimenticia anaerobia. El dióxido de carbono y el metano, así como los carbohidratos, alcoholes, ácidos carboxílicos, aldehídos, compuestos aromáticos. Cuando estos azúcares son convertidos en acetato, esta reacción fermentación se denomina homoacetogénesis [29].

Finalmente, en la metanogénesis se forma el metano, producto de la digestión anaerobia la cual se limita por el dióxido de carbono y compuestos que contengan un grupo metilo y acetato. Todos los metanógenos son arqueas que son organismos antiguos, los cuales se descubrieron en el siglo XIX gracias a la formación de metano debido a la actividad microbiológica. Según Reyes [29], en este último proceso de descomposición los microorganismos metanogénicos que son responsables de la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados que se componen de dos átomos de carbono unidos a un enlace covalente [30].

Figura 1 - 3. Proceso de digestión anaerobia.



Fuente: Los tratamientos biológicos de residuos orgánicos [30].

1.5.1 Nutrientes para la digestión anaerobia

Para generar un alto crecimiento de microorganismos que sea significativo se debe tener presente como parámetro esencial la presencia de nutrientes en el medio, gran parte de los casos el sustrato suministra dichos nutrientes, pero la mayor relevancia se presenta entre las masas de carbono y nitrógeno en el sustrato. De esta forma se puede dar una estimado del desempeño del digestor y saber si después de un tiempo este reduce, así establecer cuál es la causa más probable. El rendimiento y posterior producción del biogás dependerá del sustrato, condiciones del medio ambientales de reactor, temperatura, parámetros de pH.

Condiciones y parámetros del proceso anaeróbico:

- a. **pH:** permite determinar la toxicidad o la inhibición de las bacterias metanogénicas (toxicidad con un pH inferior a 6.0). El adecuado funcionamiento de un biodigestor presenta un pH de 6.5-7.5 el cual produce una influencia creando una actividad enzimática [31].
- b. **Temperatura:** es el más importante en el proceso, ya que está relacionado con una de las fases directas de la digestión anaeróbica, puesto que puede afectar la velocidad de reacciones en los procesos biológicos y los microorganismos que se presentan en

cada uno. A medida que va aumentando la temperatura aumentara el crecimiento de estos microorganismos, acelerando el proceso de la digestión el cual ocasiona una mayor producción de biogás. Existen tres características psicrófilos inferior a 25°C, mesófilos entre 25 - 45°C y termófilos entre 45 - 65°C. estos cambios de temperaturas en el digestor causan una alteración en el proceso, por esto, para garantizar una temperatura estable y homogénea en el proceso, se debe contar con un sistema de agitación y un control de temperatura [32].

- c. **Carga orgánica y tiempo de retención:** cantidad de carga que se hace del residuo, este dependerá del volumen que tenga el biodigestor y se relaciona con el lapso de la retención hidráulica, que es el tiempo promedio de permanencia del material orgánico en el biodigestor. Se tiene un estimado que el tiempo de conservación se relaciona con la temperatura, ya que a mayor temperatura disminuye el tiempo conservación, sin embargo, es de aclarar que esto sucede solo cuando la temperatura es constante. Al tener una mayor temperatura en el reactor no solo implica una disminución en los tiempos de conservación requeridos, sino que además los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado contenido de material disminuye [32].
- d. **Humedad:** Este factor es importante para este proceso biológico, ya que se puede, llevar a cabo partiendo de una biomasa húmeda teniendo un porcentaje de humedad mayor al 60%. Entre los cuales se establece la digestión anaerobia y la fermentación alcohólica. Por lo cual, el contenido de humedad de los residuos o desechos a tratar es un factor importante para el inicio del proceso, puesto que asegura un entorno cómodo para los microorganismos dentro del reactor [32].
- e. **Relación Carbono – Nitrógeno:** Este residuo con el cual se alimenta el reactor contiene nutrientes como nitrógeno y carbono que son fundamentales para el crecimiento de microorganismos, estas son la fuente principal de alimento de bacterias como las metalogénicas, donde el carbono es la fuente de energía y el nitrógeno sirve para la formación de nuevas células. Una característica de estas bacterias es que consumen alrededor 30 veces más carbono que de nitrógeno, por lo cual, se establece una relación adecuada de estos componentes en la materia prima considerando un rango de 30:1 hasta 20:1, sin embargo, cuando no se tienen estos rangos ideales se realiza una previa mezcla de materias obteniendo una relación adecuada de carbono y nitrógeno [33].

1.6 Biodigestores usados en la industria láctea

Un biodigestor es un dispositivo el cual es hermético, donde se ingresan residuos o desechos orgánicos y sucede una transformación por medio de microorganismos, encargados de transformar estos residuos en biogás. Deben ser herméticos para garantizar la ausencia de aire para generar un mejor funcionamiento del sistema. Este proceso durante la fermentación

genera el biogás, que se almacena en la zona superior del reactor, zona conocida como domo o campana y que recibe el nombre de gasómetro [34].

Los biodigestores varían según la complejidad y el fin para el que van a ser utilizados. Los sencillos se clasifican en grupos de digestores, los cuales son de tipo discontinuos; y los complejos, que poseen dispositivos que permiten agitarlos y mantener una temperatura o calefacción adecuada del proceso.

1.6.1 Tecnología de los biodigestores

Como se ha mencionado anteriormente, existe gran variedad de biodigestores. También existen diferentes distribuciones de la estructura, buscando con esto una mejor conformación y producción del biogás, esto dependerá a las condiciones de la biomasa a utilizar.

Con las investigaciones revisadas [35], se puede establecer un óptimo aprovechamiento de la biomasa a través de bioprocesos, con condiciones que sean apropiadas para un desarrollo de estos microorganismos. El crecimiento es proporcional a la obtención del biocombustible.

A continuación, se presentan tres de las tecnologías que se utilizan en la industria láctea para el aprovechamiento y generación de biogás.

1.6.1.1 Biodigestor de tipo UASB

Este digestor de manto de lodo de flujo ascendente también es conocido en español como RAFA (reactor anaeróbico de flujo ascendente). Su forma cilíndrica de ubicación vertical ayuda a que el efluente se integre al reactor por la parte inferior, cruzando ascendentemente el contenedor y saliendo por la parte superior.

La particularidad de este reactor es la agrupación de bacterias en forma de gránulos, que mejoran el trabajo de los microorganismos haciéndolos más eficientes en la descomposición de la materia orgánica. Esta conformación de los gránulos se consigue con un inoculo granular cuando se da a iniciar el proceso del biodigestor. El efluente va ascendiendo lentamente por medio de una columna generando un flujo vertical, los gránulos forman un manto de barro en la parte media del reactor el cual flota.

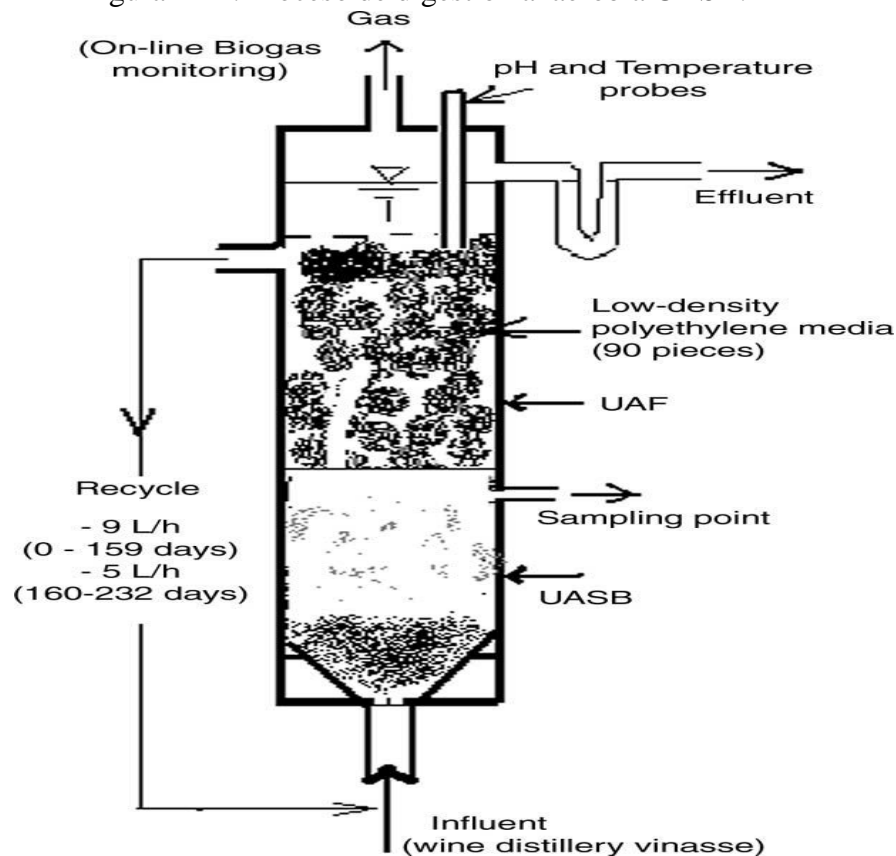
Este proceso de contacto con el efluente origina el tratamiento y la eliminación por acción de bacterias anaeróbicas que forman unas burbujas de biogás, las cuales al ascender van removiendo el líquido y ayuda a que se produzca contacto entre las bacterias y el efluente. Una vez formado el gas, este se posiciona en la zona superior del dispositivo del reactor, el residuo líquido que cruza el manto sale del reactor junto con sólidos residuales y gránulos que se derraman en un sedimentador. Estos sistemas son muy apropiados para altas cargas orgánicas y con pocos sólidos, como es el caso de las industrias lácteas. Estos reactores

realizan un tratamiento de altos volúmenes en muy corto tiempo. Con base en el volumen se puede calcular el efluente a tratar, el tamaño y su capacidad del reactor adicional. Sus dimensiones pueden variar de unos pocos metros cúbicos hasta unos 300 m³ [12].

El reactor UASB (ver Figura 1-4) es de los más utilizados en el proceso para la recuperación en aguas residuales, ya que ofrece unos amplios rangos en su tratamiento con un bajo costo de operación y ocupación de espacio. Generan baja producción de lodos y permiten resultados muy interesantes, al eliminar cargas orgánicas. Este tipo de reactor fue uno de los primeros empleados en la recuperación de las aguas residuales en la industria con concentraciones altas de materiales orgánicos. Es una de las tecnologías que más se utiliza en diversas industrias y sectores, como textil, papel, petroquímica, industria cárnica y la alimentaria [36].

Esta tecnología aplicada para el tratamiento de residuos ha venido en crecimiento en países de Latinoamérica y han obtenido una gran experiencia en países como Colombia, México, Argentina y Brasil, donde alrededor del 46% de los reactores que se utilizan trata estos residuos de forma constante [27].

Figura 1 - 4. Proceso de digestión anaerobia UASB.



Fuente: Reactor anaerobio UASB Rajinikanth [36].

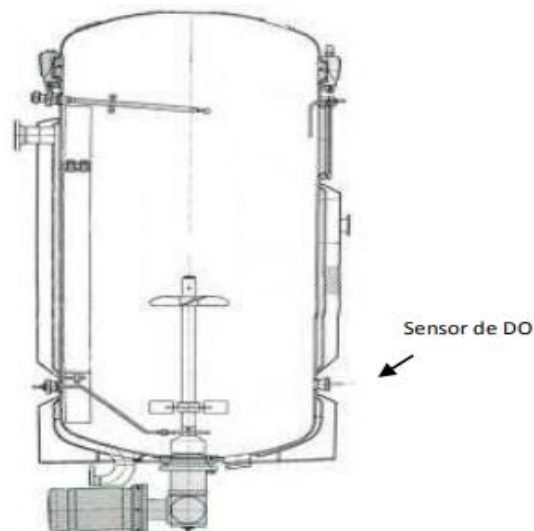
1.6.1.2 Biodigestor de tipo CSTR

Este biodigestor continuo de tanque agitado CSTR (por Continuously Stirred Tank Reactor) es de método de mezcla continua o completa. Consiste en un espacio cilíndrico vertical con agitadores o paletas que mezclan el efluente del interior constantemente. Este tipo de tecnología es apropiada con el tratamiento de efluentes que tenga un alto contenido de sólidos y residuos que pueden estar en niveles muy elevados de 6000 m³ [12].

Este reactor de tipo continuo se utiliza para el tratamiento del suero diluido y también en soluciones sintéticas del mismo. Pero, a causa de su lento crecimiento de microorganismos metanogénicos, tiene bajos beneficios al transformar estos residuos orgánicos, la cual decrece en rangos de 58-18%, limitando el tiempo de retención hidráulica.

Sin embargo, si se modifican parámetros como temperatura y operando en un sistema termofílico puede alcanzar un aumento considerable transformando la materia según estudios realizados en [37], obteniéndose resultados favorables en conversiones con datos que estuvieron entre 94.6-96.4%, ver figura 1-5.

Figura 1 - 5. Proceso de digestión anaerobia CSTR.



Fuente: Reactor industrial tipo tanque agitado-CSTR [38].

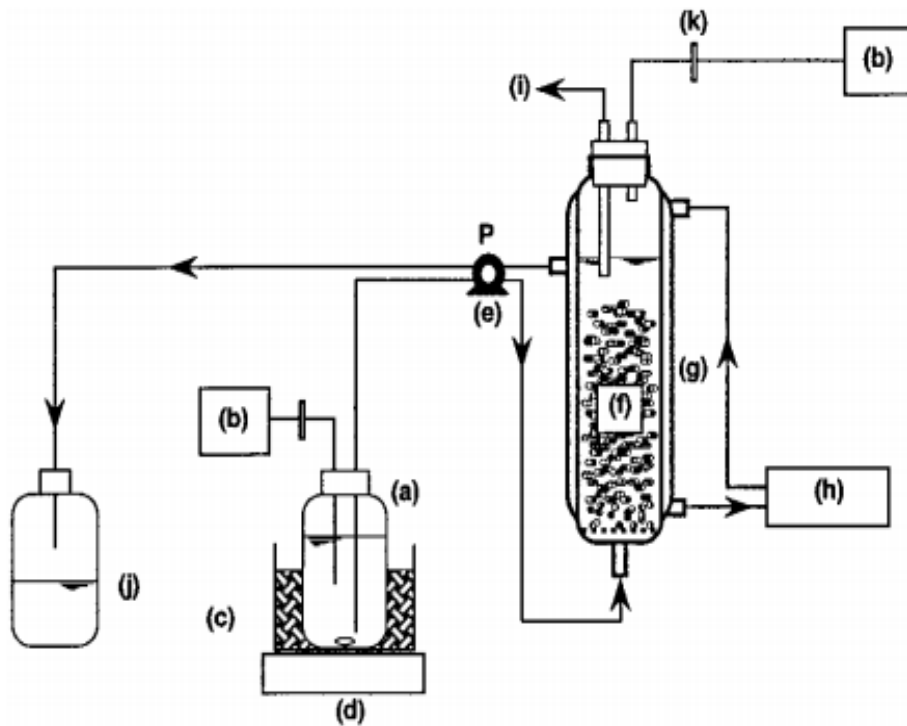
1.6.1.3 Biodigestor de tipo UAF

Este dispositivo reactor de forma tubular, su producción es forma continua y con flujo ascendente, los residuos o desechos ingresan por la zona inferior, la cual atraviesa una cama de piedras, estas eran empleadas anteriormente, pero debido a su mínimo volumen de poros que se emplean como filtros en el proceso anaeróbico los cuales producían obstrucción de la materia prima. En este momento, se están implementando plástico sintético o cerámicas

las cuales cuenta con distintos tipos de configuraciones. El plástico actual tiene volumen poroso de alrededor del 95% creando una superficie óptima más elevada entre $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ o de mayor rango, beneficiando el incremento de biopelículas en el proceso [39].

Por otro lado, este tipo de reactor presenta falencias que generan una eficiencia menor por el incremento en la acumulación de la biomasa, la cual ocasiona la aparición de las llamadas zonas muertas. Este biodigestor (ver figura 1-6) indica que la mayor parte de la biomasa que ingresa queda en la parte inferior esto debido a que es la zona de alimentación. Sin embargo, para evitar este problema se utilizan filtros que cuentan con múltiples entradas, las cuales permiten una distribución de la alimentación [40].

Figura 1 - 6. Proceso de digestión anaerobia UAF.



Fuente: Diagrama esquemático del Reactor tipo UAF. A. depósito de medio fresco. B. Bolsa de gas. C. Baño de hielo. D. Agitador magnético. E. Bomba de entrada-salida. F. Reactor UAF. G. Reactor chaqueta (30°C). H. Baño de agua y recirculación. I. Puerto de muestreo [41].

A continuación, en la Tabla 1-4 se muestra la comparación de los diferentes tipos de reactores.

Tabla 1 - 4. Comparación digestión anaeróbica de biodigestores para el lactosuero.

| TIPO REACTOR | T (°C) | CARGA ORGÁNICA | PRODUCCIÓN / VOLUMÉTRICA | MATERIA ORGÁNICA (%) |
|--------------|--------|-------------------|------------------------------|----------------------|
| UASB | 35 | 4.5 – 38.1g DQO/L | 9.6L CH ₄ /Ld | 98 |
| UAF | 35 | 1.4g DQO/Ld | 280L/kg DQO | 80 – 90 |
| CSTR | 55 | 2.750 DQO/Ld | 350L CH ₄ /kg DQO | 94.6 |

Fuente: Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrógeno [40].

1.7 Origen del biogás

El biogás es generado en dispositivos gracias a la descomposición de desechos orgánicos sus principales componentes son el metano y el dióxido de carbono. Es un producto final, después de diferentes etapas de degradación, sus características más importantes aparecen en la Tabla 1-5. En este proceso se deben controlar algunos parámetros fundamentales como temperatura, pH y sustratos, los cuales ayudan a tener una eficaz optimización de este proceso.

Tabla 1 - 5. Componentes del biogás.

| | |
|--------------------------|---|
| COMPOSICIÓN QUÍMICA | Trazas de otros gases Posee un 30 a 45% dióxido de carbono Posee un 55 a 70% metano Posee 0.1 – 0.2% ácido sulfhídrico |
| ENERGÉTICO | Posee 6.0 a 6.5 kWh m ³ |
| EQUIVALENCIA COMBUSTIBLE | Posee 0.60 a 0.65 L petróleo/m ³ biogás |
| LÍMITE EXPLOSIÓN | Posee 6 a 12% de biogás / aire |
| TEMPERATURA IGNICIÓN | Posee 650 a 750 °C (con el contenido de metano mencionado) |
| PRESIÓN CRÍTICA | Posee 74 a 88 atmosferas |
| TEMPERATURA CRÍTICA | Alrededor de -82.5 °C |
| DENSIDAD NORMALIDAD | Alrededor de 1.2 kg m ⁻³ |
| CARACTERÍSTICA DE OLOR | Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible) |
| MASA MOLAR | Alrededor de 16.043 kmol ⁻¹ |

Fuente: Manual del biogás [39].

1.7.1 Composición del biogás

El biogás está constituido por los siguiente compuestos y elementos que se indican en la tabla 1-6, esta mezcla se constituye alrededor de un 50 a 70% de metano y dióxido de carbono y otras gases como hidrogeno, nitrógeno y sulfuros [42].

Tabla 1 - 6. Características del biogás.

| CARACTERÍSTICAS | CH ₄ | CO ₂ | H ₂ S | OTROS | BIOGÁS 60/40 |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------|--------------|
| PROPORCIONES % VOLUMEN | 55 – 70 | 27 – 44 | 1 | 3 | 100 |
| VALOR CALÓRICO MJ/m ³ | 35.8 | ----- | 10.8 | 22 | 21.5 |
| KCal/m ³ | 8600 | ----- | 2581 | 5258 | 5140 |
| IGNICIÓN % AIRE | 5 – 15 | ----- | ----- | ---- | 6 – 12 |
| TEMP. IGNICIÓN °C | 650/ 750 | ----- | ----- | ---- | 650 /750 |
| PRESIÓN CRITICA Mpa | 4.7 | 7.5 | 1.2 | 8.9 | 7.5 - 8.9 |

Fuente. Manual para la producción de Biogás [42]

1.7.2 Purificación del biogás.

En el proceso anaeróbico la descomposición de los desechos produce un producto gaseoso el cual está compuesto por metano, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, vapores. Este compuesto del metano conformado por un 75% se genera de la reducción del ácido acético (CH₃COOH) y un 25 % de dióxido de carbono, algunos gases producidos como el ácido sulfhídrico y dióxido de carbono son generados en las fases de acidificación e hidrolisis las cuales estabilizan compuestos como carbohidratos y sus proteínas [43].

Para estabilizar la materia orgánica se volatiliza entre un 15% a un 25% esto dependiendo de factores como ambientales, tipos de sustratos y la ligereza de carga permitiendo metabolizar la reacción en los dispositivos de almacenamiento.

Los compuestos de dióxido de carbono y ácido sulfhídrico no generan beneficios energéticos del metano esto debido a sus altas concentraciones de gas que se produce ocasiona una reducción del poder calorífico del metano.

Cuando ocurre el proceso anaeróbico estos sulfatos se reducen por medio de bacterias y se transforman en sulfuros y gas sulfhídrico, como la siguiente ecuación.



Este gas sulfhídrico se oxida con el paso del tiempo convierte en ácido sulfhídrico lo cual genera que sea altamente corrosivo en los ductos o partes metálicas del diseño.

Se deber considerar la necesidad de remover el sulfuro de hidrogeno y gran parte del dióxido de carbono además de vapores resultantes en la mezcla de estos gases que se producen en la digestión, para este proceso se han conocido algunos métodos los cuales poden se aplicados en diseños industriales o domésticos. Se describen algunos de ellos a continuación que ayudan considerablemente en la remoción de estos contaminantes.

1.7.3 Burbujeo de agua

Es un método simple [44], para la eliminación de estas impurezas que generan el metano a través del lavado del mismo. Teniendo en cuenta una temperatura de 20 °C y una atmósfera de presión estos requerimientos para el lavado son altos donde se han diseñado columnas empacadas a presión con esto se quiere incrementar la eficiencia al absorber el dióxido de carbono. Este método tiene una falencia la cual se debe disponer de grandes cantidades de agua para que se pueda obtener un buen resultado en la disminución del dióxido de carbono y evitar una corrosión que se genera en estados ácidos durante esta remoción del dióxido de carbono que se produce en la digestión.

Al mezclarse el dióxido de carbono aumenta considerablemente la corriente del biogás reduciendo al aumentar la temperatura veamos la tabla 1-7.

Sin embargo, cuando se utilizan presiones que sean mayores a la atmósfera se deben utilizar compresores, pero surge un problema que estos se deterioran con el tiempo debido a la lata corrosión que posee el agua.

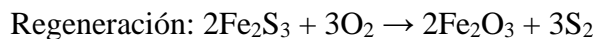
Tabla 1 - 7. Variedad de la mezcla del dióxido de carbono en su temperatura y presión

| PRESIÓN DEL DEL BIOGÁS | SOLUBILIDAD | | | | |
|---------------------------------|--|------|------|------|------|
| | Kg de CO ₂ x 100 kg de agua | | | | |
| | TEMPERATURA °C | | | | |
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| 1.3 | 0.40 | 0.25 | 0.15 | 0.10 | 0.10 |
| 10.30 | 3.15 | 2.15 | 1.30 | 0.90 | 0.75 |
| 51.70 | 7.70 | 6.95 | 6.00 | 4.80 | 3.90 |
| 103.00 | 8.80 | 7.20 | 6.60 | 6.00 | 5.40 |
| 207.00 | ----- | 7.95 | 7.20 | 6.55 | 6.05 |

Fuente. National Academy of Sciences [44].

1.7.4 Absorción química

Este método se utiliza para eliminar el gas sulfhídrico. Se realiza mediante la implementación de una esponja de hierro que se ubica antes de la salida del gas generado. El ácido sulfhídrico reacciona con este óxido férrico, lo que ocasiona que se forme una capa de sulfuro férrico y agua. Esta reproducción de óxido férrico se crea por la circulación que se presenta de aire. El método se muestra en la siguiente ecuación:



De lo siguiente Fe₂O₃ (óxido de hierro), se ubica en una expansión aproximada de cinco veces su diámetro de tubería que conduce el gas, preferiblemente antes de los equipos o

dispositivos ver figura 1-7 de aprovechamiento energético. Esta concentración de gas sulfhídrico que se generan antes o después de los procesos de su eliminación pueden ser evaluados por el método de cromatografía, donde se realiza la separación de diferentes compuestos.

Figura 1 - 7. Filtro reducción de dióxido de carbono



Fuente. Filtro de biogás – remoción de sulfuro de hidrogeno

1.7.5 Separación del vapor de agua

El vapor de agua es una fuente de contaminación la cual disminuye el poder calorífico del metano [43], y si se mezclan con el dióxido de carbono provoca estados ácidos en las tuberías, así como los sistemas donde circulara el gas, este vapor de agua se genera en reactores que funcionan con temperaturas de 20 °C

Para evitar este efecto se recomienda instalar expansiones en las tuberías de conducción a un diámetro de por lo menos de 3 a 5 pulgadas por cinco de longitud ubicadas en sentido vertical, a lo largo de este tramo se deben ubicar un registro el cual se debe accionar con una constancia de dos días. En la industria se puede eliminar a través de un intercambiador de calor que puede ser fabricado en cobre y llenado con nitrógeno líquido que estará a una temperatura d -230 °C. A esa temperatura el agua es condensada muy rápidamente llevando el gas a los sistemas de purificación.

1.8 Producción de biogás a base de suero

La producción en otros países que generan biogás a partir del suero, estos proyectos se realizaron y ejecutaron en gran parte de Europa, Estados Unidos y Latinoamérica, donde se

evidencian la evolución que ha tenido el aprovechamiento de estos residuos y su transformación como energía renovable. Descritos a continuación.

1.8.1 Europa

Existe en Europa La Asociación Industrial de Alimentos y Bebidas [45], la cual cuenta con una área específica encargada del biogás y proporciona información del desarrollo de sus actividades en este campo. De su información se puede establecer que en Austria cuenta con dos plantas generadoras de biogás a partir del lactosuero, en Francia se ubican once plantas que trabajan con residuos de los lácteos y por último en Polonia funcionan tres plantas que funcionan con una mezcla de varios sustratos.

Por destacar algunas de esta planta, se encuentra la empresa de Francia Valbio esta es especializada en el tratamiento de residuos orgánicos de fábricas de quesos algunos de sus proyectos más relevantes se pueden apreciar en la tabla 1-8.

En la actualidad países como España [46], cuenta con planta generadoras de biogás a partir de la mezcla de sustratos con el lactosuero, pero hasta el momento no se refleja o se conocen resultados obtenidos individualmente. Para mencionar la empresa Exporinsa la cual realizo un proyecto de producción de biogás con suero y purines de cerdo, con el cual generan energía eléctrica con una potencia que alcanza los 600 kW y alrededor de 560 kW térmicos.

Tabla 1 - 8. Proyectos Empresa Valbio

| PROYECTO | MILLONES LITRO SUERO AÑO | M ³ BIOGÁS AÑO | CANT VOLUMEN | UTILIZACIÓN ENERGÍA | INICIO OPERACIÓN |
|---------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------|---------------------|------------------|
| INDUSTRIA LÁCTEA ABADIA FRANCIA | 1.5 | 48.000 | 40 m3 | CALDERA | 2003 |
| LÁCTEOS GAUGRI FRANCIA | 1.5 | 78.000 | 98 m3 | CALDERA | 2008 |
| BERGER LÁCTEOS FRANCIA | 1.6 | 120.000 | 55 m3 | CALDERA | 2009 |
| LÁCTEOS BONITREX BULGARIA | 8.5 | 330.000 | 200 m3 | CALDERA | 2012 |

Fuente. Producción de biogás con suero de queso [47]

1.8.2 Estados Unidos

En este país se pueden indicar la empresa Crave Brothers, productores de leche y quesos están generando 30 m³ de suero al día y lo combinan con purines de ganado. Esta empresa con el biogás obtenido o utilizan en electricidad y energía térmica para sus distintos procesos. También la empresa Fairview Swiss Cheese utiliza suero para generar biogás el cual es utilizado para energía eléctrica a través de un generador de electricidad [48], ver figura 1-8.

Figura 1 - 8. Generador de electricidad con biogás



Fuente. Fairview Swiss Cheese [48].

1.8.3 Latinoamérica

En Latinoamérica la empresa de lácteos y energía de Chile está produciendo biogás [47], en este proceso les extraen proteínas por medio de ultrafiltración generando un concentrado de estas proteínas las cuales son enviadas a unos biodigestores. Este biogás que se obtiene sirve para generar electricidad y energía térmica. Otra empresa es la empresa Sancor Cooperativa Unidas Limitada, ubicada en Argentina donde se instaló una planta de tratamiento para residuos de suero. A nivel institucional la empresa brasileña de investigación agropecuaria, la cual tiene un proyecto el cual es financiado por Australia por medio de la agencia de cooperación internacional, en la cual realizan investigaciones sobre el aprovechamiento del suero para la generación de biogás. En este proyecto de investigación participan investigadores de países como Argentina, Brasil, Colombia, Uruguay y Australia.

Capítulo 2. Desarrollo metodológico del biodigestor

El presente diseño está enfocado a la implementación de una nueva tecnología de energía renovable, por medio del aprovechamiento de un residuo de la industria láctea que es poco aprovechado, y al ser desechado afecta el medio ambiente.

La metodología de desarrollo presenta tres fases:

- Diseño del biodigestor cálculos.
- Estudio de factibilidad.
- Estimación de costos.

A partir de esas fases y de las actividades relacionadas con cada una, se enfrentó el diseño de un biodigestor para la empresa Delilácteos San Martin del municipio de Tuta, Boyacá, para el aprovechamiento del lactosuero actualmente desechado.

2.1 Tecnologías aplicadas a partir del suero

Se efectúa una búsqueda de tecnología o apelaciones a partir de la utilización del suero como materia prima la cual nos indica como se puede utilizar para la generación de energía eléctrica, térmica y otros fines industriales y domésticos.

La aplicación de estas tecnologías puede ser de gran ayuda imprimiéndolas en la industria láctea supliendo necesidades como turbinas de gas que provoquen energía eléctrica al mover un generador eléctrico o energía térmica para alimentar calderas de estas empresas.

2.1.1 Aspectos para convertir el suero en biogás

- a. Demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno**, este nivel del sustrato se puede medir por la correlación entre DBO y DQO, para el suero la relación es de 2:1 en la cual muestra una alta degradabilidad en comparación con sustratos bovinos en los que se encuentran residuos como pasto y otros compuestos que son difíciles de degradar.

Figura 2 - 9. Proyecto asesorado por viogaz



Fuente. Conversión de suero lácteo a biogás

- b. Alcalinidad o pH**, al realizar un manejo óptimo y adecuado en el tratamiento de los afluentes por medio de la digestión anaeróbica en productos como el suero lácteo el cual posee un alto estado de bio-degradabilidad y presenta un contenido mayor de materia orgánica que se presenta como DQO, sin embargo, esta etapa es muy importante en el proceso del biodigestor en especial cuando se trata de residuos como el suero, por lo cual, esto nos indica que la alcalinidad se puede agregar tanto artificialmente o al revolver el sustrato del suero con otros sustratos altamente alcalinos como excretas de ganado o cerdos, este proceso se haría hasta cuando el biodigestor alcance su estabilidad en el proceso.
- c. Nutrientes**, la presencia de algunos de ellos son importantes en el momento de establecer un adecuado funcionamiento del biodigestor ya que la degradación del suero lácteo debe portar ciertos metales ya que sin ellos disminuye considerablemente un 15 % de generación de biogás, por lo cual estos componentes como magnesio, potasio, sodio, calcio, fósforo, hierro, cobre entre otros son de gran importancia, pero sin exceder cantidades mínimas en su composición.

Por lo anterior se debe considerar que en la biodegradación de sustratos como el suero deben contener una composición como alcalinidad, adición de nutrientes como suplemento y su

pH el cual no debe estar por debajo de los 6.6, para lo cual el diseño debe asegurar estos aspectos para un buen funcionamiento adecuado en la generación de biogás.

2.1.2 Facilidades de la implementación del suero en la producción del biogás

a. Alta producción de biogás

La generación de biogás está estimada teóricamente de 0.35 m³ de CH₄ esto por cada kg de DQO esto degradado en el biodigestor, en relación un promedio de 1000 litros de suero se podría obtener unos 36 m³ de biogás, con un 65% de metano.

b. Implementación de biodigestores pequeños

Al diseñar digestores anaeróbicos en los cuales e implementen sustratos como el suero trae ventajas ya que permiten desacoplar el tiempo de retención hidráulica con el de retención de sólidos, esto conlleva a lograr biodigestores que puedan generar biogás en tiempos más cortos que oscilan de 3 a 5 días.

Se puede decir que el suero es un excelente componente industrial ya que por cada 100 litros que se desecha las empresas lácteas al producir 10 kg de queso se puede obtener un equivalente a 2 litros de gasolina en biogás. Por otra parte, la implementación de la digestión anaeróbica se convierte en una opción positiva que se implantan diseños y tecnologías logrando en tiempos muy cortos resultados en la producción de biogás disminuyendo la inversión.

2.1.3 Diseño planta de tratamiento para producción de biogás rico en hidrogeno

Un proyecto presentado en la Universidad de Cádiz de España [49] plantea mitigar la contaminación ambiental por el manejo inadecuado de los residuos que proceden de las fábricas queseras.

Para ello se planteó un diseño, dimensionamiento y una selección de unidades de una planta de tratamiento anaeróbico del lactosuero la cual generaría biogás rico en hidrogeno considerándolo como un vector muy importante como energía alternativa ya que en su proceso de producir energía se libera en forma de agua, disminuyendo las emisiones de agentes que son contaminantes por el uso de combustibles tradicionales.

Con este proceso se quiere reducir la elevada carga orgánica del producto inicial, llevándolo posteriormente a una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas, esto dependería del resultado final y de sus características.

Al obtener in biogás rico en hidrogeno el cual es catalogado como energía limpia puesto que en su consumo este es liberado en combustión de vapor de agua lo que no generaría contaminación alguna siendo un producto de energía limpia del futuro.

Actualmente un 80% de la energía que es consumida en el mundo proviene de los combustibles fósiles, para mitigar esta problemática un grupo de investigadores están buscando nuevas alternativas de energías limpias las cuales sean más eficientes y considerables con el medio ambiente.

Esta propuesta se basa en la implementación de equipos como:

a. Equipos de flotación

En esta etapa el lactosuero circula por el equipo de flotación por lo cual este residuo posee solidos suspendidos por ello es necesario un tratamiento para limpiar estas impurezas antes de ingresar al biodigestor evitando problema a futuro como taponamientos en los equipos instalados.

b. Intercambiador de calor

El lactosuero almacenado en un tanque es llevado hasta el intercambiador de calor, el cual se encarga de elevar su temperatura la cual esta inicial de 5°C subiéndola hasta los 36°C final, esto se logra por medio de la circulación de agua procedente de la salida de la caldera de la planta.

c. Digestor acidogénico

En este proceso se produce la transformación de la materia orgánica del lactosuero con la activación de microorganismos en la cual se produce una corriente gaseosa compuesta por gran parte de hidrogeno, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico.

d. Digestor metanogénico

En esta eta se genera una reducción de la materia orgánica que no haya sido degradada en el reactor

En el reactor metanogénico, de tipo tanque agitado, continúa el proceso de reducción de la materia orgánica que no ha sido degradada en el reactor acidogénico y los ácidos grasos volátiles formados por los microorganismos en la primera fase son transformados en un biogás formado mayoritariamente por metano y dióxido de carbono. El volumen del digestor es de 12,83 m³, el tiempo hidráulico de retención es 62 horas y la producción de biomasa 23,98 kg/d. La producción diaria de metano es de 10,64 m³, que se almacenará en el gasómetro G-02 para posteriormente ser conducido a la planta láctea principal para uso energético.

- Gasómetros
- Bombas
- Entre otros

2.1.4 Industria láctea alimenta planta de biogás con suero de leche

La empresa Fluence corp [50] realizó la conversión de residuos orgánicos en energía en granjas lecheras y procesadoras de derivados de la leche convirtiendo estas empresas más productivas y sostenibles. De esta forma, las plantas de biogás utilizan estos residuos generados como su principal materia prima en la digestión anaeróbica lo que genera que estas empresas ahorren significativamente dinero así mismo cumplen con las normas sanitarias al tratar estos afluentes contaminantes.

Este proceso no solo está generando biogás sino fertilizantes orgánicos los cuales son usados como fuente excelente en cultivos siendo una alternativa menos contaminante que los fertilizantes minerales comunes.

Figura 2 - 10. Tanque Reactor de Mezcla de Flujo Continuo.



Fuente: Industria Láctea Alimenta Planta de Biogás con Suero de Leche

Actualmente, la empresa de lácteos Latteria e Caseificio Moro s.r.l., ubicada en el noreste de Italia la cual produce quesos y derivados desde los años 70 la cual se convierte como principal productora en Italia. Este proceso conlleva al desecho de suero generado de la leche, inicialmente lo utilizaban para alimentar cerdos pero la baja demanda y la recesión económica de granjas porcinas produjo que estas empresas de lácteos tuvieran que encontrar otra forma de deshacerse de estos residuos contaminantes, la empresa Latteria e Caseificio, trató estos desechos a través de una planta de tratamiento de efluentes pero con altos costos para ser tratados y la regulación ambiental europea ocasiono que la empresa tomara otra iniciativa de solución de bajo costo y sin disminuir con la operación de la fábrica.

La empresa fluence realizó la renovación del sistema que tenía la empresa de lácteos Latteria e Caseificio Moro s.r. donde implementaron un nuevo compartimento de digestión anaeróbica donde llegan los residuos generados del proceso de la elaboración de los quesos sin interrumpir el funcionamiento de la planta. Después de un periodo de cuatro años realizaron una actualización en la parte anaeróbica donde adaptaron un sistema de

desulfuración del biogás modificando la tecnología que se utilizaba sin alterar cambios estructurales en la obra que existía.

2.1.4.1 Funcionamiento

El residuo del suero generado por el queso se fermenta anaerómicamente, cuando se digiere el digestato (material residual) estos se separan en líquidos y sólidos, la parte sólida se utiliza en la agricultura y la líquida se reenvía a la planta de tratamiento aeróbico que posee la empresa. El proceso de la digestión anaeróbica reduce considerablemente gran parte del carbón orgánico que posee el suero generado y deja el nitrógeno sin alterar sus propiedades.

2.1.5 Aprovechamiento energético de lactosueros y otros residuos en queserías

La industria alimentaria en Canarias está aprovechando los residuos como lactosuero [51] posee un programa COAG (Coordinadora de Organizaciones de Agricultores y Ganaderos donde trabajan los residuos de pan, los residuos de suero y salvado. lo que quiere la empresa es estimar las cantidades que se desechan al año para que de esta manera puedan conocer los posibles usos, tratamientos que se pueden realizar con estos residuos.

Para llevar a cabo este proyecto de investigación, se recogen muestras de lactosuero (mezcla vaca y cabra) procedentes de las respectivas queserías, la cual trabaja con volúmenes de aproximadamente 20.000 litros diarios entre leche de vaca y de cabra. Por otro lado, también se recogen muestras de pan, procedentes de la industria BIMBO y salvado. Utilizan una tecnología cromatografía de gases como técnica analítica para el estudio de muestras de gas

El cromatógrafo consta de dos columnas en paralelo donde tiene lugar la separación de los distintos componentes de la muestra inyectada. En la primera columna se produce la separación del oxígeno, nitrógeno y posible metano; mientras que en la segunda tiene lugar la separación del monóxido de carbono, aire, metano y dióxido de carbono.

Figura 2 - 11. Instalación experimental



Fuente: Aprovechamiento energético de lactosueros de queserías y los residuos de otras industrias alimentarias

Se llegó a la conclusión que con estos residuos pueden llegar a tener una gran producción de biogás por eso decidieron incrementar un nuevo contenedor de gas acumulado para este residuo. Por ello, se planteó un sistema experimental distinto diseñando un nuevo contenedor de gas

Tabla 2 - 9. Clasificación de las mezclas utilizadas.

| MEZCLA DE CODIGESTION | IDENTIFICACIÓN |
|------------------------------|----------------|
| 88% lactosuero – 12% inóculo | L – I |
| 48% pan – 52% inóculo | S – I |
| 35% salvado – 65% inóculo | P - I |

Fuente. Aprovechamiento energético de lactosueros de queserías y los residuos de otras industrias alimentarias.

Como se muestra en la tabla la digestión anaerobia de los siguientes residuos: lactosuero (L), restos de pan (P) y salvado (S), tanto de forma individual como en presencia de un inóculo (lodo de depuradora, I) con el fin de comprobar de qué manera se obtienen mejores resultados. Todos los residuos con y sin inóculo, así como el inóculo utilizado, fueron caracterizados por medio del análisis del contenido en sólidos totales, fijos y volátiles, tanto antes como después del proceso de digestión anaerobia.

Como conclusión se puede decir que el residuo de Pan presenta una mayor producción de biogás que el Lactosuero, antes y después de reactivar. Sin embargo, con el residuo Lactosuero como ya se mencionó, una vez finalizada la producción de biogás después de reactivar el pH, se observa una reactivación propia del sistema ocasionando que finalmente este residuo presente una mayor producción final de biogás (10,89 L/kg) frente a los 6,93 L/kg obtenidos con el pan.

2.1.6 De residuo a biogás: aprovechamiento del suero lácteo

Este artículo [52] nos dice que en Argentina genera alrededor de 11 millones de litros en el día en promedio de lactosuero como resultado de la fabricación de productos como queso y sus derivados, de esa totalidad se tiene un estimado el cual seis millones de litros de este suero son arrojados a los desagües sin tener algún tratamiento o realizar un control el cual evite la contaminación ambiental.

Sin embargo, existen empresas interesadas en realizar cambios significativos aprovechando este residuo que se genera, por lo cual técnicos de centro INTI-ambiental realizan estudios en busca de nuevas alternativas energéticas aplicada con el lactosuero para la obtención de biogás.

Figura 2 - 12. Lactosuero como fuente de energía.



Fuente. De residuo a biogás: aprovechamiento del suero lácteo

El lactosuero por sus componentes los cuales poseen una alta carga orgánica que permiten generar una biodigestión óptima convirtiéndose en una alternativa viable para su transformación y aprovechamiento del residuo.

Según estudios e investigaciones de especialistas, una planta la cual procesa 25 m^3 de leche al día estaría generando alrededor de 18 m^3 de suero, con este residuo y tomando referencia datos de experimentos indica que la capacidad energética y calorífica del metano puede ser estimada en 278 m^3 de biogás por día, por ello, se convierte en una fuente de energía atractiva que podría llegar a ser el reemplazo de combustibles tradicionales como GLP, gas natural, gas oíl o leña que son utilizadas en calderas como fuente de energía.

Este trabajo que realizaron los técnicos de INTI está basado en un estudio del potencial energético del lactosuero, el cual mediante un sistema de biodigestores se determinó la eficiencia en la remoción de carga orgánica que contiene el sustrato y se calculó la capacidad de producción de biogás.

En los estudios y pruebas realizadas determinaron que el volumen de metano que se genera y el caudal de alimentación del sustrato es de 9.5 m^3 de metano por cada metro cubico de suero, estos resultados aseguran que este proceso se plantearía como una alternativa viable la cual mejoraría significativamente la calidad productiva beneficiando gran parte de las industrias lácteas.

2.1.7 Conclusiones de estas investigaciones tecnológicas

El análisis de la producción de biogás por medio de diversas tecnologías aplicadas es de consideración muy útil para el tratamiento de residuos con el lactosuero que se genera en la producción de quesos y sus derivados, estos desechos biodegradables producen un combustible de gran valor nutricional el cual puede ser aplicado en los suelos o abonos agroindustriales. Además, produce un gas el cual se puede utilizar como generador de

energía eléctrica por medio de turbinas o plantas generadoras a gas, también como energía térmica utilizada en hornos, secadoras, calderas o sistemas de combustión a gas.

2.1.7.1 Tecnología para empresas de lácteos

La producción de biogás que se genera es una oportunidad considerable y eficiente en el consumo y su desarrollo de la economía de las empresas queseras. Por lo cual, este proceso de digestión anaeróbica es viable en aplicarse positivamente en los residuos generados de la leche con es el suero y sus subproductos.

Aplicando un estudio y diseño óptimo en la digestión anaeróbica a estos desechos orgánicos como el suero se podría obtener un porcentaje muy considerable que supla las necesidades de granjas, empresas y plantas productoras de lácteos.

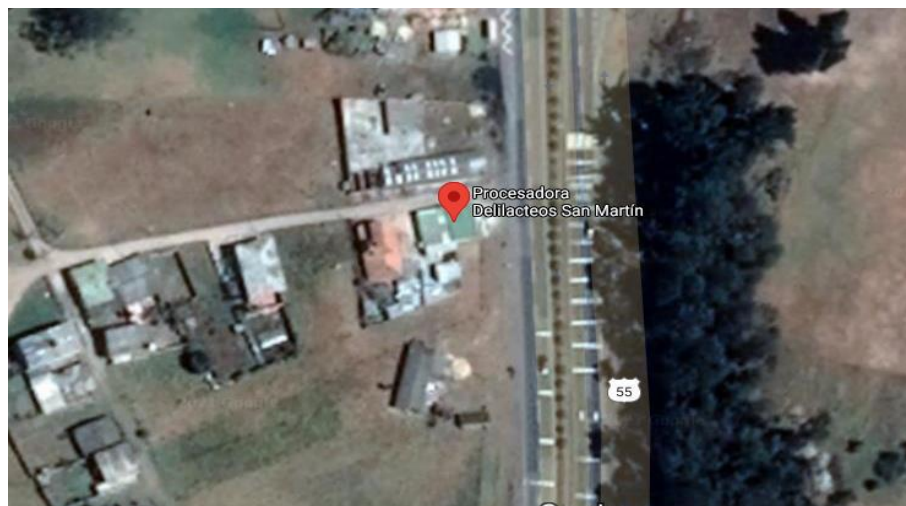
Este tipo de tecnología donde se convierten y transforman estos residuos orgánicos en energía pueden ser a futuro un pasivo en activo de ahorro en dinero y un manejo apropiado del suero evitando contaminación ambiental.

2.2 Características generales de la empresa Delilácteos san martín

Esta empresa está conformada por 15 empleados administrativos y operativos, se encuentra ubicada en el sector vereda san martín del municipio de Tuta Boyacá, jefe de operaciones señor Saul Suarez supervisa dos turnos de producción diaria, a continuación, algunas características.

De acuerdo con el croquis tal como se puede observar la figura 2 – 13, para llegar a la planta se puede acceder por las siguientes vías que llevan al sector vía Paipa - Tunja donde está ubicada la planta Delilácteos san martín.

Figura 2 - 13. Ubicación de la empresa.



Fuente. Google Maps

2.2.1 Servicios básicos disponibles:

- a. **Energía eléctrica:** en cuanto al servicio, la planta cuenta con una conexión de red pública, y además hay otra toma cercana a cien metros de distancia, el proveedor es la empresa de Boyacá Ebsa.
- b. **Agua:** cuenta con una conexión de agua subterránea de presión, que puede ser aprovechada en los procesos productivos, la empresa maneja su propia red de alcantarillado ya que en la zona no cuenta con el servicio por parte del municipio de Tuta.

2.2.2 Proveedores de materia prima

La empresa cuenta con un tanque para el transporte de leche con capacidad de 1500 litros de leche, en la cual se mantiene a una temperatura máxima de 15° C para evitar que se dañe el producto. Del total de la leche que ingresa a planta de producción (1319 litros diarios) en promedio.

Como resultado de la elaboración del queso se genera un subproducto conocido como lactosuero o suero lácteo, que constituye entre un 80 % y 90 % del total de la leche [2]

La empresa Delilácteos san martín cuenta dos tanques de almacenamiento de 5000 litros los cuales el 70 % del lactosuero es vertidos a los terrenos aledaños, lo que ocasiona la contaminación del suelo y del agua del lugar y el porcentaje restante que el 30 % es vendido para la alimentación de cerdos ver tabla 2-10.

Tabla 2 - 10. Suero generado día

| Suero total promedio día* | 30 % alimentación animal (cerdos) | 70% regado en pasto (contaminación) |
|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1055 litros | 316.5 litros | 738.5 litros |

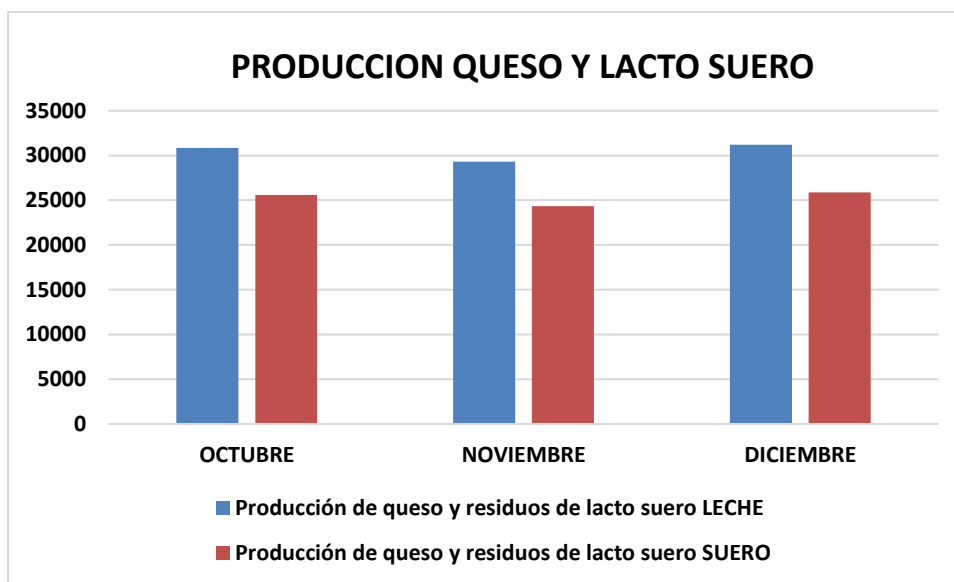
Fuente. Autor

Nota. El promedio de leche diaria de 950 - 1319 litros, después del procesamiento genera alrededor de un 80% es suero (1055 litros día), ver anexo 2.

Se realizó un estudio trimestral del volumen de lactosuero del proceso de elaboración de queso del proceso durante los meses octubre, noviembre y diciembre de 2020 ver figura 2-14, basados en la información y control que suministra la empresa con el objetivo de tener un valor referencia de la cantidad que se desecha del subproducto con efectos contaminantes para el medio ambiente, los resultados obtenidos indican que el mes de mayor volumen de

lacto suero fue diciembre con un valor promedio de 1006.13 L/día, estos resultados se observa en la tabla 2 – 11.

Figura 2 - 14. Promedio generación lactosuero



Fuente: Autor

Tabla 2 - 11. Promedio lactosuero

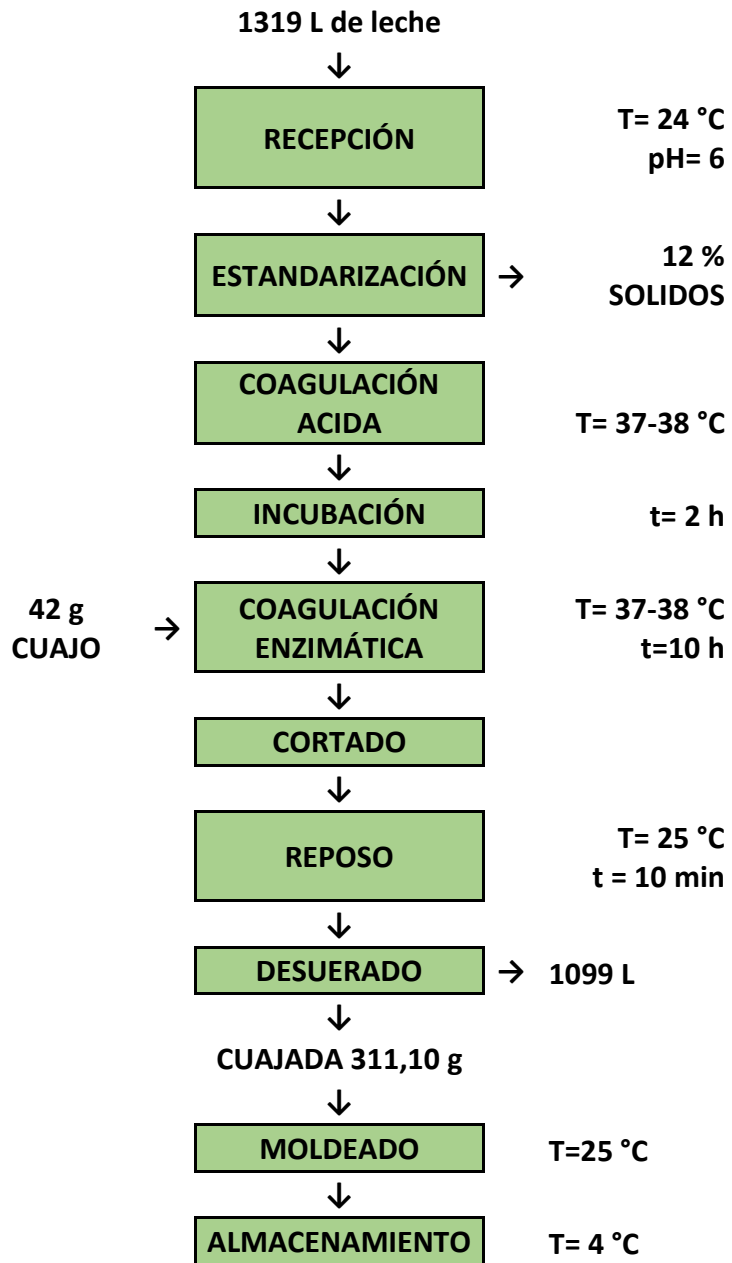
| Producción de queso y residuos de lacto suero | | | |
|---|-------|---------|----------|
| | LECHE | SUERO | PROMEDIO |
| OCTUBRE | 30830 | 25588,9 | 994,52 |
| NOVIEMBRE | 29320 | 24335,6 | 977,33 |
| DICIEMBRE | 31190 | 25887,7 | 1006,13 |

Fuente: Autor

2.2.3 Diagrama de volumen y masa

Para la elaboración del diagrama de volúmenes y masa ver figura 2 – 15 se tomó en cuenta que la empresa utiliza 1319 L/día promedio de leche para la elaboración de queso dando como resultado 132 kg de queso y de residuo (lacto suero) de 1006 L/día promedio.

Figura 2 - 15. Diagrama volumen y grasa



Fuente. Información suministrada por empresa

2.3 Demanda energética de la empresa

Para determinar el diseño del biodigestor se debe determinar claramente cuál será su objeto, ya que en dependencia de las necesidades a satisfacer puede presentar ciertas variaciones. En el proceso de la digestión interviene gran número de variables a tener en cuenta, como: material orgánico que servirá de afluente; factores como el clima, el pH; y su capacidad entre otros factores y recursos. En consecuencia, se debe establecer un diseño que permita obtener buenos resultados operativos del mismo.

2.3.1 Necesidades energéticas de la empresa

El consumo energético se determinó en base a la información de recibos suministrados por la empresa ver anexo 3.

Para la comparación del valor del consumo de energía, se toma como referencia las tarifas de energía eléctrica de la empresa EBSA (Tarifas-EBSA-ABRIL-2021), con esta información se puede realizar una estimación de ahorro significativo para la empresa por medio de la generación de biogás y su transformación en energía eléctrica renovable se quemara este gas por medio en una turbina de gas que a su vez esta acoplada a un generador eléctrico lo que reducirá significativamente el valor de consumo con respecto a la energía tradicional.

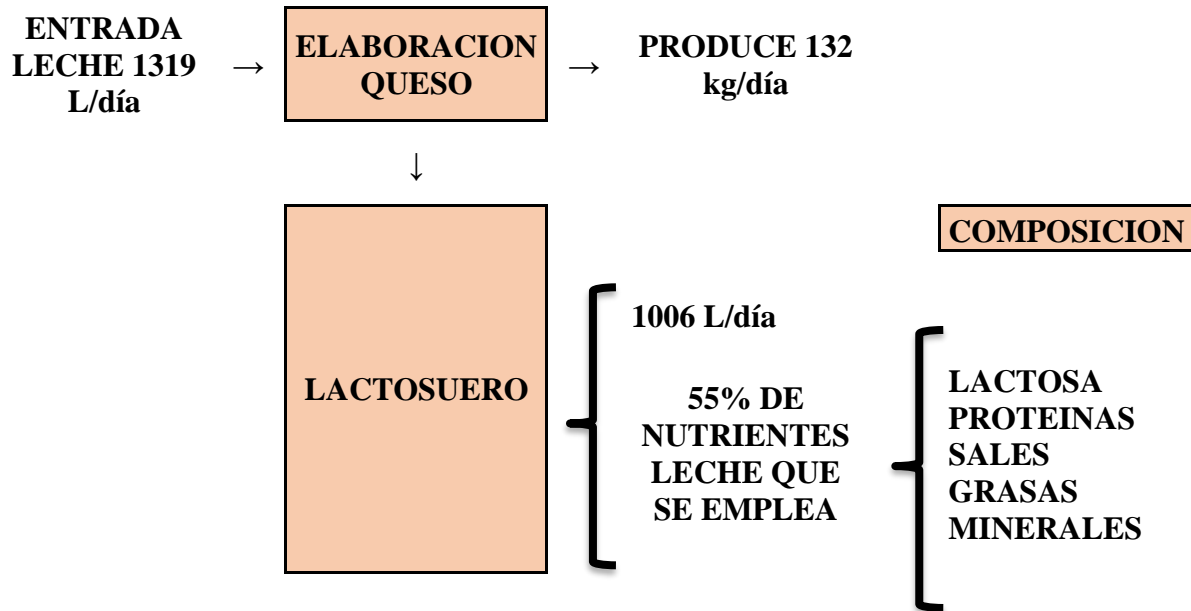
2.4 Información necesaria para el diseño y cálculos del biodigestor

2.4.1 Cantidad de suero generado

Se debe realizar una estimación de la cantidad de suero que genera la planta para ello se elabora un registro para establecer la cantidad diaria de leche que ingresa a la planta para la elaboración de quesos y sus derivados, partiendo de la recolección de la información del suero que se desecha se realiza un estimado que se puede observar en el anexo 2.

En la figura 2 - 16 se puede observar la estimación diaria de suero que genera la empresa que se determina por el ingreso de leche que se hace diariamente aproximada de 1319 L/día y una producción de queso y derivados de 132 kg.

Figura 2 - 16. Esquema de los residuos



Fuente. Autor

2.4.2 Datos importantes

Como referencia debemos tener en cuenta algunos datos importantes ver tabla 2 – 12 de equivalencias energéticas con respecto al biogás generado.

Tabla 2 - 12. Equivalencias energéticas

| | CANTIDAD EQUIVALENCIA | TIPO DE BIOMASA O SUSTRATO | CAPACIDAD ENERGÉTICA |
|---------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1 METRO CUBICO DE BIOGÁS | 0.7 kg de gas LP | Carbón | 8.5 kWh/kg |
| | 0.60 litros de Diesel | Diesel | 12 kWh/kg |
| | 0.60 metros cúbicos (m ³) | Gas natural | 5.3 kWh/m ³ |
| | 0.24 m ³ | Gas propano | 25 kWh/m ³ |
| | 1 m ³ de biogás | Genera electricidad | 1.2 kWh |

Fuente: aqualimpia engineering e.k

En la siguiente tabla 2 – 13 se encuentran las características del biogás con relación a otros gases

Tabla 2 - 13. Características del biogás comparado con otros gases.

| BIOGÁS VS OTROS GASES | | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------|---------------|--------------------|----------------|---------------|------------------|
| TIPOS DE GAS | UNIDAD | BIOGÁS | GAS NATURAL | PROPANO | METANO | HIDROGENO |
| Poder calorífico | kWh/m ³ | 6 | 10 | 26 | 10 | 3 |
| Peso específico | kg/m ³ | 1.25 | 0.7 | 20.1 | 0.72 | 0.09 |
| Relación a la densidad del aire | ----- | 0.9 | 0.54 | 1.51 | 0.55 | 0.07 |
| Temperatura de encendido | °C | 700 | 650 | 470 | 600 | 585 |
| Contenido de oxígeno para explosión | Vol. -% | 6 - 12 | 4.4 - 15 | 1.7 – 10.9 | 4.4 – 6.5 | 4.7 |

Fuente: aqualimpia engineering e.k

En la Tabla 2 - 14 Se puede concluir que el biogás tiene un poder calorífico menor al del gas natural y el propano teniendo una relación del porcentaje del gas metano. También nos indica que su densidad es de 1.25 kg/m³ lo que genera que sea menos pesado que el aire. Su temperatura de encendido este alrededor de los 700 °C y su velocidad 0.25 m/s esto debido a su contenido de CO₂ del biogás la cual se puede quemar cuando hay una mezcla con el oxígeno entre un contenido de 6 – 12% a comparación del propano e hidrogeno que requieren menores un porcentaje inferior de oxígeno para su encendido.

Tabla 2 - 14. Poder calorífico

| GAS | PODER CALORÍFICO | UNIDAD |
|----------------------------|-------------------------|--------------------|
| Biogás | 22.000 | BTU/m ³ |
| CH ₄ | 47.390 | BTU/kg |
| Bunker C | 41.025 | BTU/kg |
| GLP (gas licuado petróleo) | 47.222 | BTU/kg |
| Gas natural | 36.000 | BTU/m ³ |
| Etanol | 20.105 | BTU/kg |
| Diesel | 40.700 | BTU/kg |
| Biodiesel | 31.964 | BTU/kg |
| Gasolina | 41.844 | BTU/kg |
| Propano | 47.438 | BTU/kg |
| Metanol | 15.057 | BTU/kg |

Fuente: aqualimpia engineering e.k

2.4.3 Ubicación del biodigestor

Según información que nos brinda el autor [54], se debe tener en cuenta varios factores importantes a la hora de determinar la ubicación del biodigestor como son:

- ✓ Diseñar un sistema el cual permita que la descarga y carga del sustrato se realice por gravedad.
- ✓ El sitio de ubicación del biodigestor debe estar cerca de la salida del sustrato a utilizar
- ✓ Se debe evitar que las paredes del biodigestor tengan contacto directo con el suelo, esto podría alterar su óptimo funcionamiento.

En el cumplimiento de estas recomendaciones la empresa cuenta con un área adecuada para realización e implementación de este sistema manteniendo distancias, temperaturas favoreciendo su funcionamiento.

2.4.4 Tiempo de Retención Hidráulica y Tasa de Carga Orgánica

Se debe tener presente el volumen del biodigestor, que se debe adaptar a la cantidad del sustrato que se suministra con relación a la velocidad de degradación del mismo, por cual los microorganismos deberán tener un tiempo estimado para realizar su proceso de descomposición, por lo cual, la concentración de la materia orgánica no se debe sobrepasar en su alimentación ya que alteraría los microorganismos. Por lo anterior, para tener un equilibrio se calculan dos parámetros hallando el volumen del biodigestor como son:

- Tasa de carga orgánica (OLR)
- Tiempo de retención hidráulica (TRH)

El volumen del biodigestor se debe adaptar a la cantidad de sustrato a alimentar y a la velocidad de degradación del sustrato. Por un lado, los microorganismos deben tener un tiempo suficiente para realizar el proceso de degradación y, por otro lado, la concentración de la materia orgánica no debe ser de un nivel que permita la sobrealimentación de los microorganismos. Para garantizar un correcto equilibrio entre estos factores se utilizan dos parámetros para calcular el volumen del biodigestor: la Tasa Orgánica de Carga (OLR) y el tiempo de retención hidráulica [55].

Esto nos dice que la tasa orgánica de carga, se define como la cantidad de materia seca volátil (VDM) que es introducida en el biodigestor, la cual esta expresada en kilogramos de materia volátil por metro cuadrado por día

$$\frac{kg \text{ VDM}}{m^3 \cdot dia}$$

Tabla 2 - 15. Tasa de carga orgánica.

| TIPOS BIODIGESTORES | OLR (kg x VDM / m ³ . día) |
|--|---------------------------------------|
| Reactor tipo tanque continuamente CSTR | 2 – 3 |
| Flujo de pistón | 4 – 5 hasta 10 |

Fuente: The Biogás Handbook: Science, Production and Applications.

Flujo de pistón: en este tipo el sustrato ingresa es empujado en forma de pistón por el sustrato que ingresa el día siguiente, también son llamado de flujo continuo, lo que hace que no se mezcle el sustrato el uno con el otro, para ello se emplea sustratos espesos este tipo de biodigestores no presentan sedimentación o flotación en su interior lo cual no requiere separación de solidos fibrosos al ingresar los residuos [56]

El tiempo de retención hidráulico, es el periodo o lapso en el cual los sustratos permanecen en el interior del biodigestor, este TRH debe ser elegido de tal forma que permita una óptima degradación que sea adecuada sin que aumente o altere el volumen del digestor.

Por lo cual, tanto la OLR y TRH se refiere al volumen del biodigestor disponible para los sustratos el cual producirá un volumen que se genera por encima del líquido que se requiere para el almacenamiento del gas que se produce.

Para este caso se tomara una retención hidráulica de 10 días, el cual se determina basado en los resultados obtenidos en estudios y pruebas [55], aplicado en un biodigestor de una fase y con sustrato de lactosuero, en esta aplicación obtuvieron una reducción cerca del 95% de COD demanda química de oxígeno, una concentración de metano del 68% y producción de biogás de 0.35 L.CH₄/g [57].

2.5 Criterios para realizar el diseño

El diseño y biodigestor se establece según los siguientes criterios:

2.5.1 Tipo de biodigestor

Se debe seleccionar un biodigestor que mejor se adapte a las necesidades de la empresa por lo cual se tendrá en cuenta los siguientes parámetros como:

- a. Disponibilidad de espacio físico
- b. Costo y complejidad en la construcción
- c. Facilidad de acceso para limpieza y mantenimiento

Para su selección del tipo de biodigestor se prioriza los sistemas semicontinuos esto ya que la producción de suero por parte de la empresa fluctuante, por lo cual, se puede emplear dos tipos de biodigestores de tipo hindú y chino, para saber cuál es la mejor opción para su implementación se hace una ponderación de 1 a 4 a los parámetros anteriormente especificados ver tabla 2-16.

Tabla 2 - 16. Rango de ponderación

| Valores de ponderación | |
|------------------------|----------|
| 1 | Muy bajo |
| 2 | Bajo |
| 3 | Medio |
| 4 | Alto |

Fuente: The Biogás Handbook: Science, Production and Applications.

2.5.1.1 Biodigestor semicontinuo

Para este diseño se implementará un biodigestor de tipo semicontinuo, por lo cual, se ingresa la carga orgánica en el biodigestor y se retira el afluente de manera periódica, ya que la producción de suero es fluctuante y depende de la cantidad de leche que se recoge a diario, sin embargo, se podrá operar de forma continuamente en el tiempo sin necesidad de detener su operación en el proceso.

Para ello, se requiere que tenga:

- a. Se debe ubicar el biodigestor cerca del tanque de almacenamiento de la materia prima
- b. El depósito de almacenamiento de la biomasa (suero) estará ubicado a una altura considerable lo cual hará que llegue al biodigestor por gravedad
- c. El biodigestor debe estar libre de oxígeno manteniendo un ambiente anaeróbico adecuado para la producción de biogás
- d. Se emplea un depósito de gas el cual permitirá un continuo almacenamiento con ellos se podrá utilizar constantemente

Con este tipo de biodigestor semicontinuo, los nuevos volúmenes de cargas de materia prima agregadas son calculados en función al tiempo de retención hidráulico, para este caso etaria en 10 días en promedio, y se descarga el afluente regularmente en la misma cantidad que se incorporó.

2.5.2 Temperatura para su operación

La empresa se encuentra ubicada vía Paipa Tunja, a una altura de 2.300 metros sobre el nivel del mar. Debido a estas condiciones la temperatura mínima promedio es de 25°C y la máxima es de 37°C en la zona de ubicación del biodigestor.

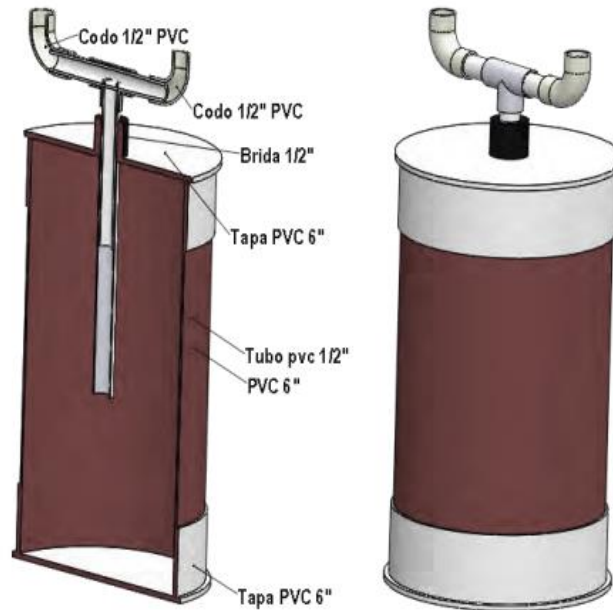
Este parámetro es importante ya que la temperatura de operación es importante para el diseño del biodigestor, dependiendo de la temperatura de operación existen 3 tipos de digestión (psicofísica, Mesofílica y termofílica). Donde nos dice, que a temperaturas más altas la velocidad de degradación de la materia orgánica es más rápida, por lo cual, el tiempo de retención disminuye al igual que el volumen del biodigestor. Sin embargo, teniendo en cuenta las temperaturas bajas que pueden predominar en la zona para el diseño del biodigestor se tendrán en cuenta los siguientes parámetros [58]

- a. El biodigestor debe permanecer con una temperatura entre los 30 y 40 °C para su digestión mesofílica.
- b. El biodigestor estará ubicado en un área la cual estará cubierta y mantendrá un ambiente ideal con ello se evita pérdidas de temperatura y alterar sus condiciones internas del reactor.

2.5.3 Válvulas de seguridad

La válvula de seguridad nos ayuda a mantener estable las presiones positivas o negativas del biodigestor, estas controlan la presión en su operación que ocurre al interior del biodigestor evitando que las membranas o los tanques se inflen demasiado llegando a explotar.

Figura 2 - 17. Válvula de seguridad



Fuente. Autor

Este dispositivo de 30 cm contiene una columna de agua de 20 cm, el sirve para controlar las sobrepresiones que se pueden generar adicional sirve para condensar el agua que sale junto al biogás esta ubicado a la salida del biodigestor.

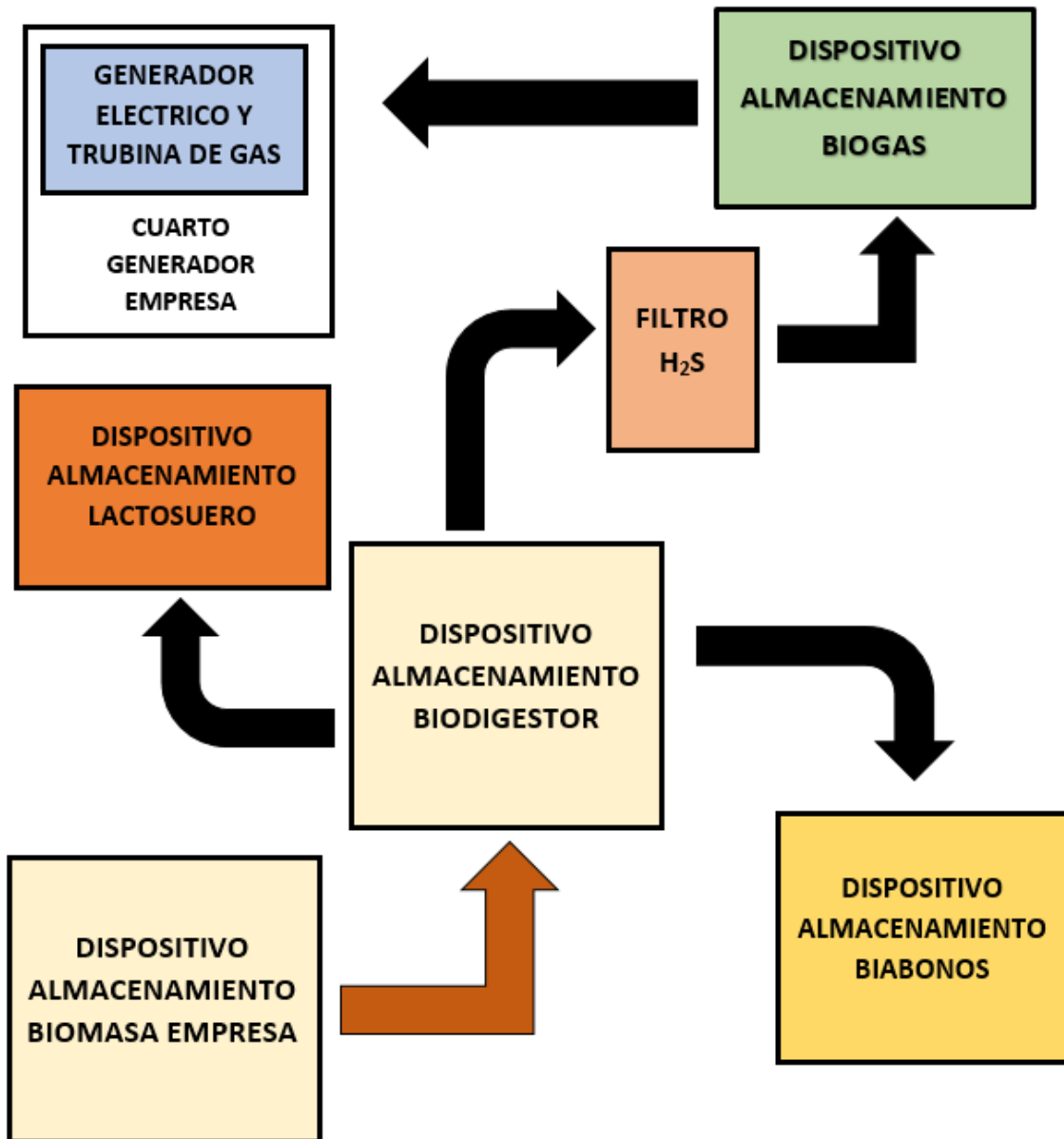
En la parte superior se realiza un orificio se coloca una brida de 1/2 pulgada por el cual ingresara el tubo de 1/2 pulgada, el cual ingresa hasta la trampa y se sumerge hasta la columna de agua, cada vez, que exceda la presión el biogás saldrá por el tubo que permanece sumergido el cual realizara un desplazamiento de la columna librando la presión ejercida

2.6 Diseño del biodigestor

2.6.1 Dimensionamiento del biodigestor

Por medio de las siguientes ecuaciones se podrá obtener y determinar de forma más clara las dimensiones y su producción de biogás que genera la planta, ver figura 2-18 la cual nos indica el funcionamiento de la planta a diseñar del biogás.

Figura 2 - 18. Esquema planta de biogás



Fuente. Autor

2.7 Ecuaciones de diseño y dimensionamiento del biodigestor

Tabla 2 - 17. Datos importantes para el dimensionamiento del biodigestor

| PARAMETROS | VALOR | UNIDAD MEDIDA |
|--|-------|---------------------------|
| Producción mensual suero día | 1006 | L/día |
| Días generación de suero | 30 | Dia/mes |
| Densidad suero | 1026 | kg/m ³ |
| Mes mayor producción Diciembre | 25887 | litros |
| Factor de seguridad tanque alimentación | 0.5 | % |
| Factor de seguridad para el tanque biodigestor | 0.05 | % |
| Producción de biogás | 0.49 | m ³ día/kg VDM |
| Tiempo retención hidráulica TRH | 10 | días |
| 1 mol de H ₂ S | 56 | gr Fe |
| Materia seca DM | 5 | % |
| Solidos totales volátiles VMD | 85 | % |

Fuente: Autor

En la tabla 2-17 se indican los valores para realizar cálculos del biodigestor y su dimensionamiento, entre otras características considerables del lactosuero.

2.7.1 Volumen del tanque de alimentación.

El volumen del tanque de alimentación para el suero lácteo se calcula a través de la ecuación [59].

Ecuación 1. Volumen tanque alimentación.

$$VTA = VLD * 1,5$$

Donde:

VTA: Volumen del tanque de alimentación (m³)

VLD: Volumen lactosuero generado día (m³)

El valor de 1,5 constituye un factor de seguridad salpicaduras, derrames y facilitar la homogenización de sustrato antes de entrada al biodigestor

$$\begin{aligned} VTA &= VLD * 1,5 \\ VTA &= 1.006 * 1,5 \\ VTA &= 1.509 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Tabla 2 - 18. Capacidad almacenamiento de suero generada.

| ALMACENAMIENTO PLANTA DIA | SUERO GENERADO POR DIA | SUERO ALAMCENADO (THR) ESTIMADA EN 10 DIAS |
|---------------------------|------------------------|--|
| 20.000 m ³ | 1.5 m ³ | 15 m ³ |

Fuente. Autor

De lo anterior se indica que diariamente se generara 1006 litros de suero y teniendo un factor de seguridad de 1.5 no daría 1509 litros diarios, estimando una retención hidráulica de 10 días para que el suero ingrese al biodigestor por lo cual se almacenaría 15 litros o 1.5 m³.

En este momento la planta cuenta con un tanque de almacenamiento de 10.000 litros el cual es bombeado a diario en cada producción, sin embargo, para la ejecución del diseño se selecciona un tanque circular el cual tienen una capacidad de 20.000 litros para almacenar el suero generado ver anexo 4, este dispositivo está ubicado en la parte superior de la empresa.

2.7.2 Volumen de sustrato.

El cálculo del volumen del sustrato generado por medio de las siguientes ecuaciones se tomando el mayor valor resultante:

- a. Tiempo de retención hidráulico [55].

Ecuación 2. Volumen sustrato.

Donde:

VSB: Volumen de sustrato al biodigestor (m³)

THR: Tiempo de retención hidráulico (días)

VLD: Volumen diario de lacto suero generado (m³/día)

$$VSB = THR \times VLD$$

$$VSB = 10 \times 1006$$

$$VSB = 10.06 \text{ m}^3$$

b. Tasa de carga orgánica [55]

Ecuación 3. Volumen alimentación al biodigestor.

$$VSB = VLD * DM * VDM / OLR$$

Donde:

VSB: Volumen de sustrato alimentado al biodigestor (m³)

VLD: Volumen diario de lacto suero generado (kg/día)

DM: Materia seca (5%)

VDM: Sólidos totales volátiles (85% de VDM)

OLR: Tasa de carga orgánica (kg.VDM/m³.día)

$$VSB = VLD * DM * VDM / OLR$$

$$VSB = 1006 * 5 * 85 / 5$$

$$VSB = 8.85 \text{ m}^3$$

c. Partiendo de la ecuación [59]

Ecuación 4. Volumen de sustrato alimentado al biodigestor

$$VSB = VLD * THR$$

Dónde:

VSB: Volumen de sustrato al biodigestor (m³)

VLD: Volumen diario de lacto suero generado (m³/día)

THR: Tiempo de retención hidráulico (días)

$$VSB = VLD * THR$$

$$VSB = 1.006 * 10$$

$$VSB = 10.06 \text{ m}^3$$

Verificando los tres resultados dos de ellos son similares, mientras que uno tiene un valor menor, para este caso se tomará el resultado mayor para su dimensionamiento el cual será de 10.6 m³.

2.7.3 Volumen cúpula de gas

El volumen de la cúpula de gas se determina a través de la siguiente ecuación [54].

Ecuación 5. Volumen de cupula

$$VG = VSB * PBL$$

Dónde:

VG: Volumen de biogás (m³)

VSB: Volumen de sustrato al biodigestor (kg)

PBL: Producción de biogás del suero lácteo (0.49 m³/kg)

$$VG = VSB * PBL$$

$$VG = 10 * 0.49$$

$$VG = 4.9 \text{ m}^3$$

2.7.4 Volumen total del biodigestor

El volumen total del biodigestor es la suma del volumen del sustrato de carga y el volumen de la cúpula de gas generado [59].

Ecuación 6. Volumen Total del Biodigestor

$$VTD=(VSB+VG) * fs$$

Dónde:

VTD: Volumen del Biodigestor (m³)

VSB: Volumen de sustrato al biodigestor (m³)

VG: Volumen requerido para biogás (m³)

Fs: Factor de seguridad (%)

Se toma como referencia un valor de seguridad de 10% en base a la recomendación de [60]

$$VTD=(VSB+VG) * fs$$

$$VTD= (10.06 + 4.9) * 0.10$$

$$fs = 14.9 * 0.10 = 1.49$$

$$VTD= (14.9 + 1.49)$$

$$VTD= 16.39 \text{ m}^3$$

El volumen total del biodigestor requerido para una retención hidráulica de 10 días será de 16.39 m³ en promedio.

2.7.5 Volumen dispositivo de descarga

El volumen del dispositivo de descarga debe tener como mínimo la capacidad del volumen del tanque de alimentación.

Ecuación 7. Volumen dispositivo descarga

$$VTd=VTA$$

Dónde:

VTd: Volumen de tanque de descarga (m³)

VTA: Volumen del tanque de alimentación (m³)

$$VTd= 1.509 \text{ m}^3$$

Se toma el mismo valor de alimentación de carga

2.7.6 Producción de biogás

Ecuación 8. Producción de biogás.

$$PB = \frac{(dL * VSB) DM}{100} * \frac{VDM}{100} * PBL$$

Dónde:

PB: Producción de biogás (m³/día)

VSB: Volumen de sustrato alimentado al biodigestor (m³)

dL: Densidad de lacto suero (kg/ m³)

DM: Materia seca (5%)

VDM: Sólidos totales volátiles (85%)

PBL: Producción de biogás del suero lácteo (m³ biogás/kg día)

$$PBL = \frac{(1026 * 1.006) * 5}{100} * \frac{85}{100} * 0.49$$

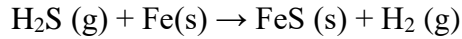
$$PBL = 1.026 * 1006 * 0.05 * 0.85 * 0.49$$

$$PBL = 21.49 \text{ m}^3 \text{ biogas}$$

Con el anterior valor se hace la estimación de la producción de biogás día, mes y año como se evidencia en la tabla 2-26.

2.7.7 Filtro de ácido sulfúrico

En la eliminación del sulfuro de hidrogeno (H_2S) del biogás se implementa un filtro de Hierro (Fe), se describe en la siguiente reacción química:



Para determinar la masa de hierro que se requiere como filtro se establece con la siguiente ecuación.

a. Cálculo del ácido sulfúrico:

Ecuación 9. Acido sulfúrico

$$H_2S \text{ producido} = \frac{0.1\%}{100 \text{ L de biogas}} \left(\frac{v}{v}\right)$$

Dónde:

V: Litros de biogás por día (L)

$$H_2S \text{ producido} = 8.87 \text{ L/día}$$

$$H_2S \text{ producido} = 8.87 \text{ L/día} * 30 \text{ días}$$

$$H_2S \text{ producido} = 266.1 \text{ L/mes}$$

$$H_2S \text{ producido} = 8.87 \text{ L/día} * 365 \text{ días} = 3237.55 \text{ L } H_2S \text{ año}$$

b. Cálculo de número de moles:

Ecuación 10. Cálculo de moles

$$PV = n R T$$

Dónde:

P: Presión absoluta (atm)

n: Volumen específico (mol)

R: Constante del gas (L.atm/mol.K)

T: Temperatura (K)

P: 1 (atm)

n: Volumen específico (mol)

R: 0.082 (Latm/mol.K)

$$T: 25 + 273.15 = 298.15 \text{ (K)}$$

Despejando n:

$$n = \frac{PV}{RT}$$

$$n = \frac{1 \text{ atm} * 3237.55 \text{ litros}}{0.082 \text{ litros} * 298.15 \text{ }^\circ\text{K}}$$

$$n = 132.42 \text{ mol H}_2\text{S}$$

c. Cantidad de kg de hierro requerido

Entonces, moles de ácido sulfúrico por 56 gr de Fe

Ecuación 11. Hierro requerido

$$Fe = \frac{n * 56 \text{ g Fe}}{1 \text{ mol H}_2\text{S}}$$

$$Fe = \frac{132.42 \text{ mol H}_2\text{S} * 56 \text{ g Fe g Fe}}{1 \text{ mol H}_2\text{S}}$$

$$Fe = 7415.52 \text{ g Fe}$$

2.7.8 Reserva de gas

Para el almacenamiento del biogás se utilizará una bolsa neopreno de 7 metro de largo por 2 metros de diámetro su ficha técnica aparece en el Anexo 5. Este volumen se calcula así:

Ecuación 12. Volumen reserva de gas

$$V_B = \pi * (r^2) * l$$

Donde:

V_B : volumen de reserva de biogás

R: radio (m)

L: largo (m)

$$V_B = \pi * (1^2) * 7$$

$$V_B = \pi * (1^2) * 7$$

$$V_B = 21.99 \text{ m}^3$$

2.8 Generador Diesel

Para la generación se implementaría un generador modelo PRG20L ver figura 2 -19 que se utilizaría para obtener energía eléctrica supliendo algunas necesidades para el funcionamiento de la planta las especificaciones técnicas de este generador se pueden observar en la tabla 2 – 19 y 2 - 20, el tiempo máximo de uso de este generador esta alrededor de las 8 a 12 horas de funcionamiento.

Figura 2 - 19. Generador eléctrico Preston.



Fuente: Generador Eléctrico Diesel Prg20l [61].

Tabla 2 - 19. Características técnicas del generador.

| CARACTERÍSTICAS GENERADOR ELÉCTRICO PRESTON | | | |
|--|-----------|-------------------------|------------|
| MODEL | PRG20L | N°. | 1401125038 |
| RATE POWER | 20 KVA | RATE SPEED | 1800 RPM |
| FREQUENCY | 60 Hz | PHASE POWER FACT | 3/0,8 |
| RATED VOLTAGE | 120/208 V | RATE CURRET | 55,5 A |
| DATE | 2014,01 | NET WEIGHT | 840 kg |

Fuente: Generador Eléctrico Diesel Prg20l [61].

Tabla 2 - 20. Principales características del motor.

| CARACTERISTICAS | DESCRIPCION | MEDIDA | MEDIDA |
|------------------------|--------------------------|---------------|---------------|
| Motor | 4TNV84T – GGE | ----- | ----- |
| Factor de potencia | ----- | 0.8 | ----- |
| Combustible | Diesel / Adaptable a gas | 3.3 | L/h |
| Capacidad del tanque | ----- | 40 | L |
| Tiempo máx. uso | ----- | 8 – 12 HORAS | H |
| Rpm | ----- | 1800 | ----- |
| Eficiencia eléctrica | ----- | 85 | % |
| Arranque | Eléctrico | 12.24 | V |
| Eficiencia mecánica | ----- | 60 | % |

Fuente: Generador Eléctrico Diesel Prg20l [61].

El generador se ubicará a un costado del sitio donde se almacenará el lactosuero, la cantidad de energía eléctrica que se genera a través de este residuo que genera biogás diariamente se establece en la ecuación 13 según el autor [62], y los datos necesarios para realizar el cálculo se muestran en la Tabla 2 – 20.

Tabla 2 – 21. Datos del generador.

| PARÁMETRO | MEDIDA | UNIDAD MEDIDA |
|--------------------------|---------------|----------------------|
| Poder calorífico metano | 35.7 | MJ |
| % de metano en el biogás | 60 | % |
| Poder calorífico biogás | 21.4 | MJ |
| Horas de funcionamiento | 8 | h |
| Eficiencia eléctrica | 83.7 | % |
| Eficiencia mecánica | 60 | % |

Fuente: Revalorización del lactosuero mediante obtención de energía por biodigestión de la lactosa [62].

Ecuación 13. Cálculo de la Energía generada

$$E_{ekWh} = \frac{PBL * PCB * \frac{Efe}{3.6 kW}}{HD}$$

Donde:

Ee kWh – energía eléctrica generada (kW/día)

PBL – producción de biogás (m³/día)

PCB – poder calorífico del biogás (MJ/m³)

Efe – eficiencia eléctrica (kW)

HD – horas de funcionamiento al día (h/día)

$$E_{ekWh} = \frac{21.49 * 21.4 * \frac{0.837}{3.6 kW}}{8}$$

$$E_{ekWh} = 13.36 kWh/día$$

Se realiza el cálculo de la energía que generaría la producción de biogás al día alrededor de 13.36 kWh/día

2.9 Análisis de datos de la empresa

En este diseño se desea obtener un porcentaje significativo de biogás, para suplir la necesidad de consumo de energía de la empresa. En la Tabla 2-21 se refleja el consumo diario y mensual en la empresa.

Tabla 2 - 22. Consumo de energía eléctrica de la planta.

| EQUIPO | Potencia [W] | Diario [horas] | Cantidad | Diario [Wh] | Mensual [Wh] | Valor anual kW |
|-----------------------|---------------|----------------|------------|---------------|----------------|---------------------|
| Nevera - Refrigerador | 420 | 16 | 1 | 6720 | 201600 | \$ 1.792.028 |
| Selladoras | 1,2 | 4 | 2 | 9,6 | 288 | \$ 2.606 |
| Tajadoras | 370 | 3 | 2 | 2220 | 66600 | \$ 571.701 |
| Marmitas | 1500 | 5 | 2 | 15000 | 450000 | \$ 3.832.575 |
| Balanzas | 10 | 4 | 2 | 80 | 2400 | \$ 21.235 |
| Computador | 120 | 6 | 1 | 720 | 21600 | \$ 181.182 |
| Luminarias | 100 | 5 | 10 | 5000 | 150000 | \$ 1.187.800 |
| Bomba de agua 1 Hp | 750 | 3 | 1 | 2250 | 67500 | \$ 581.920 |
| Bomba para lácteos | 750 | 2 | 1 | 1500 | 45000 | \$ 375.380 |
| TOTAL | 4021,2 | | | 33.500 | 1004988 | \$ 8.548.937 |
| | | | kWh | 33,5 | 1005 | |

Fuente: Autor. Nota: Mes Wh promediado 30 días calendario.

Como se observa en la Tabla 2-22, la empresa diariamente consume un promedio de 33.5 kWh día, según la ecuación 13 (Cálculo de energía que se consume), el consumo se estima en 13.36 kWh/día, por lo cual la empresa tendría un promedio de ahorro como se indica en la Tabla 2-23, y teniendo como referencia las tarifas de energía eléctricas de la empresa EBSA (ver Anexo 3), el estimado de energía eléctrica generada estaría alrededor de un 40% de beneficio económico en el consumo de la empresa.

Tabla 2 - 23. Consumo promedio de energía eléctrica.

| CONSUMO ENERGÍA DIA EMPRESA | GENERACIÓN ENERGÍA DEL DISEÑO | |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------|
| 33.5 kWh – DIARIO | 13.36 kWh/día | 400.8 kW MES |
| CONSUMO MENSUAL kWh | AHORRO CON GENERACION BIOGAS | AHORRO MESUAL |
| 1005 kWh | 40% | \$ 413.000 |

Fuente: Autor

2.9.1 Consumo eléctrico empresa

En la tabla 2-22 se indica el costo de la energía eléctrica consumida por la empresa en los periodos de junio 2020 a junio 2021, los cuales generan un resultado de un valor comprendido ver tabla 2-24, vemos un promedio de kWh consumido por la empresa.

Tabla 2 - 24. Promedio kWh consumido

| Valor promedio | | |
|----------------|------------|--------------|
| kWh/día | kWh/mes | kWh/anual |
| \$ 23.750 | \$ 712.500 | \$ 8.549.000 |

Fuente. Autor

En la tabla 2-24, se realiza una comparación del costo de la energía eléctrica de la empresa comprendidos para los periodos entre el mes de junio 2020 y junio 2021, con un valor en promedio de \$ 657.600 mensuales, que representa un costo total de \$ 8.549.000 por año.

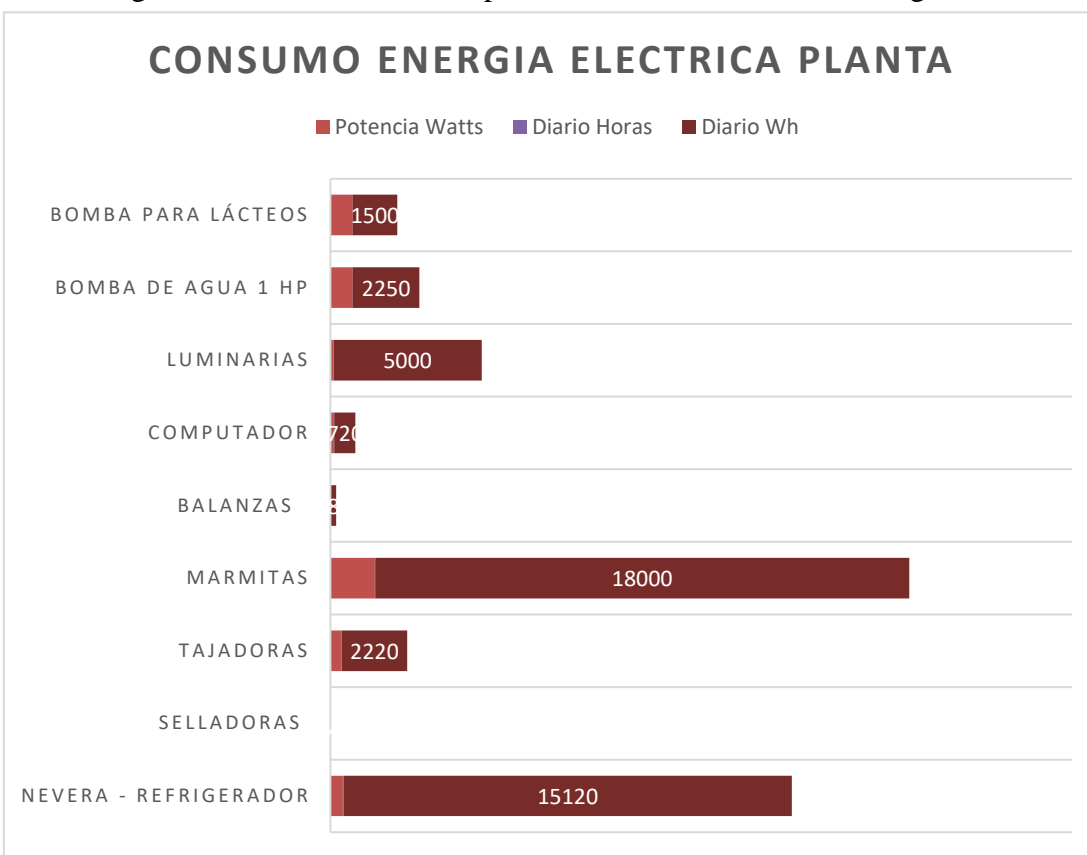
Tabla 2 - 25. Consumo y valor de energía anual

| MES | CONSUMO kWh | COTO (COP \$) |
|--------|-------------|---------------|
| jun-20 | 1005 | \$ 688.425 |
| jul-20 | 956 | \$ 654.860 |
| ago-20 | 943,2 | \$ 646.092 |
| sep-20 | 977 | \$ 669.245 |
| oct-20 | 981 | \$ 671.985 |
| nov-20 | 960 | \$ 657.600 |
| dic-20 | 960 | \$ 657.600 |
| ene-21 | 953 | \$ 652.805 |
| feb-21 | 950 | \$ 650.750 |
| mar-21 | 951 | \$ 651.435 |
| abr-21 | 943 | \$ 645.955 |
| may-21 | 957 | \$ 655.545 |
| jun-21 | 944 | \$ 646.640 |
| | 12480,2 | \$ 8.548.937 |

Fuente. Autor

Como se observa en la figura 2-20 se realiza una comparación de consumo energético de la planta de producción dando, donde el área de mayor consumo está en las marmitas lo que equivale a un total de \$ 3.832.600 siendo un 45 %, en segundo lugar, tenemos el refrigerador con 21% con un valor de \$ 1.792.000 y en tercer lugar las luminarias con un valor de \$ 1.187.800 siendo los tres valores los más elevados en la comparación analizada anualmente.

Figura 2 - 20. Gráfica de comportamiento del consumo de energía diaria.



Fuente: Autor.

Para el cubrimiento de estas necesidades energéticas requeridas para la empresa y con el uso del biogás a través de un generador eléctrico, por lo cual, se estima que la planta de biogás estaría generando 7843.85 m³/año ver tabla 2-26.

Tabla 2 - 26. Producción estimada biogás

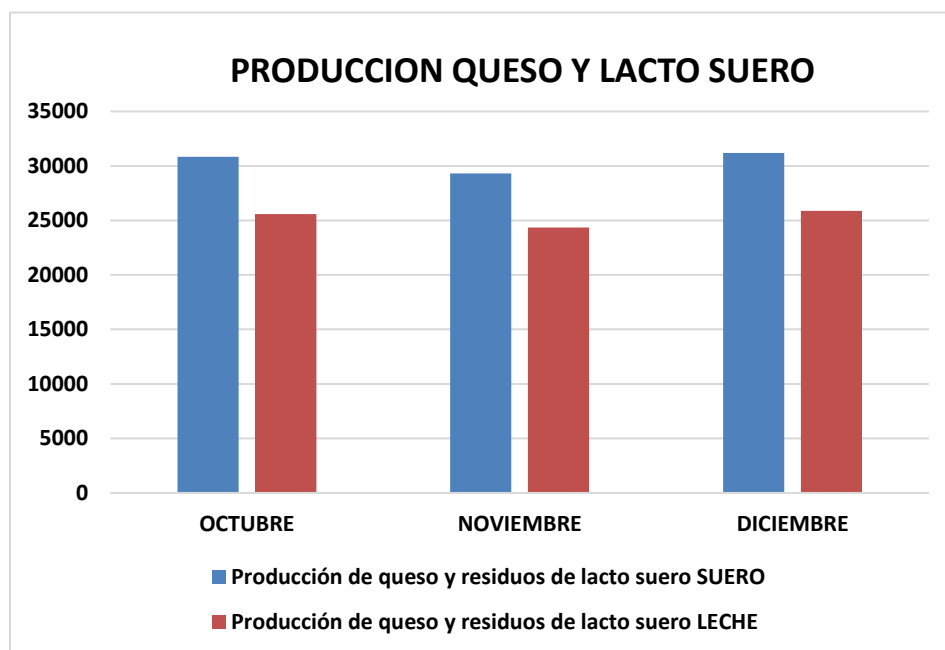
| Producción | Día | Mes | Año |
|--------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Biogás | 21.49 m ³ | 644.7 m ³ | 7843.85 m ³ |
| electricidad | 26.86 kWh | 805.8 kWh | 9803.9 kWh |

Fuente. autor

2.9.2 Requerimientos de diseño

Para estos requerimientos del diseño se establece un promedio mensual de suero generado por la Delilácteos, se tomaron referencia los meses como octubre, noviembre y diciembre 2020 suministrados por la empresa.

Figura 2 - 21. Promedio generación lactosuero



Fuente: Autor

Tabla 2 - 27. Producción de suero promedio

| Producción de suero | | | |
|---------------------|-------|---------|----------|
| | LECHE | SUERO | PROMEDIO |
| OCTUBRE | 30830 | 25588,9 | 994,52 |
| NOVIEMBRE | 29320 | 24335,6 | 977,33 |
| DICIEMBRE | 31190 | 25887,7 | 1006,13 |

Fuente. autor

El mes en el cual se generó mayor residuo de suero fue diciembre, con cerca de 25900 litros y con un promedio de 1006 por día, siendo este mes en el cual se produjo mayor cantidad.

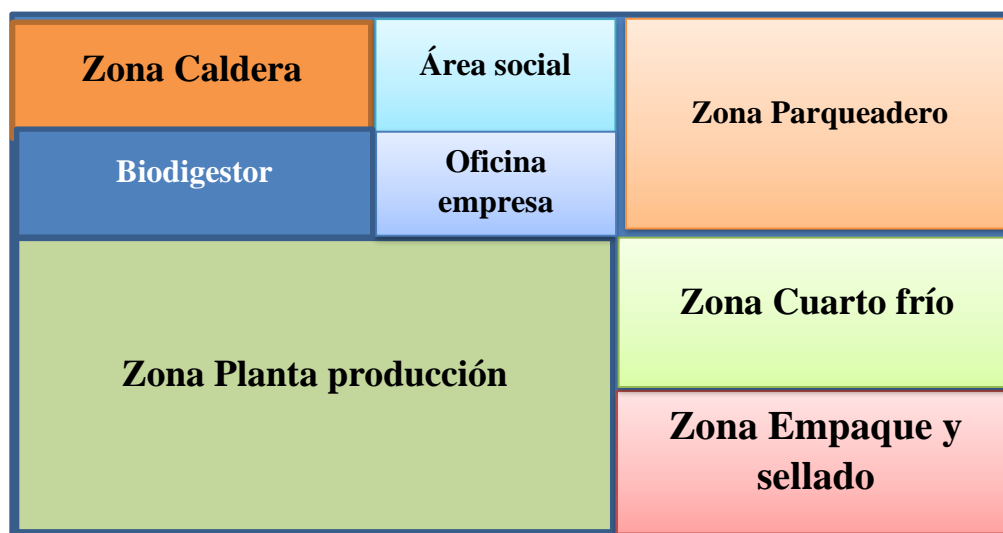
2.9.3 Ubicación del biodigestor

El biodigestor se localizará entre la zona de producción y la caldera en un cuarto cerrado mantenido una temperatura estable no menor a 35 °C, con facilidad y disponibilidad de acceso, como se puede observar en la Figura 2 -22 el biodigestor se va ubicar cerca zona de producción de la empresa.

Al estar ubicado en esta zona facilitara la manipulación del mismo operativamente, ya que se encuentra cerca al tanque de almacenamiento que posee la empresa y estará en una zona cubierta lo cual mantendrá una temperatura oprimada para su funcionamiento evitando alteraciones en su interior, también al estar ubicado a la zona de producción facilitara la interconexión posterior del generador para el suministro de energía eléctrica.

Actualmente la planta cuenta con una infraestructura construida de 50 metros de largo y 30 metros de ancho, con un total de 1500 metros cuadrados de superficie. La distribución de las áreas productivas.

Figura 2 - 22. Distribución de la empresa.



Fuente: Autor.

2.9.4 Biodigestor

Se hace un estimado comparativo en tipo de biodigestores chino e hindú que sea más adecuado para el diseño como se muestra en la tabla.

Según las características de los biodigestores el que más se adaptaría es de tipo chino por sus costos y mayores beneficios, su vida útil la cual esta alrededor de los 20 años, adicional es el más utilizado para residuos agrarios especialmente para la industria láctea, su

producción de biogás es constante al igual que su abono que se genera después de la digestión anaeróbica.

Tabla 2 - 28. Características biodigestores chino e hindú

| CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO | | |
|--|---|--|
| PARAMETROS | CHINO | HINDU |
| Costo de construcción | Bajo | Alto |
| Vida útil | Alto | Media |
| Sustratos | Residuos agrarios, lactosuero, excretas humanas | Estiercol y tratamiento aguas residuales, agrarios |
| Producción biogas (m ³ biogas/m ³ biodigestor) | 0.1 – 0.4 | 0.4 – 0.6 |
| Espacio construcción | Debe ser enterrado parcialmente | Puede ser enterrado, o superficie plana (tener temperatura adecuada) |

Fuente: Autor

2.9.5 Requerimientos del biodigestor

Establecido los cálculos y resultados se indican en la Tabla 2-29 las características para el diseño del biodigestor.

Tabla 2 - 29. Resultados obtenidos para el diseño

| CARACTERÍSTICAS | MEDIDA | UNIDAD MEDIDA |
|----------------------------------|---------------|----------------------|
| Tipo biodigestor CHINO | ----- | ----- |
| Tiempo retención | 10 | Días |
| Volumen tanque cargar y descarga | 1.509 | m ³ |
| Volumen biomasa | 10.06 | m ³ |
| Volumen de alimentación | 1.006 | m ³ |
| Volumen de cúpula | 4.9 | m ³ |
| Volumen del biodigestor 10 días | 16.39 | m ³ |
| Producción biogás | 21.49 | m ³ |

Fuente: Autor

Según los resultados obtenidos se conoce que el tipo de biodigestor a implementar es de tipo chino, con un tiempo de retención de 10 días, se alimentara diariamente con 1.006 m³ de lactosuero y su volumen total ver ecuación 6 donde se calculó el volumen total del biodigestor de 16.39 m³

2.9.6 Especificaciones del tanque biodigestor

En la tabla podemos identificar las características del tanque que se selecciona para el diseño del biodigestor el cual cálculos el volumen total en promedio de 16.39 m³, sugiriendo un tanque con capacidad de 20 m³, por lo cual, nos brinda una margen de capacidad.

Tabla 2 - 30. Especificaciones del tanque del biodigestor

| CARACTERISTICA TANQUE – PLASTICO PVC | | |
|--------------------------------------|--------|---------------|
| CARACTERISTICAS | MEDIDA | UNIDAD MEDIDA |
| Volumétrica | 20000 | litros |
| Diámetro | 250 | cm |
| Diámetro tapa | 50 | cm |
| Altura | 452 | cm |
| Peso | 20.5 | kg |

Fuente: Autor

Ecuación 14. Volumen de tanque biodigestor requerido

$$V = \pi * (r)^2 * h$$

$$V = \pi * (125)^2 * 452$$

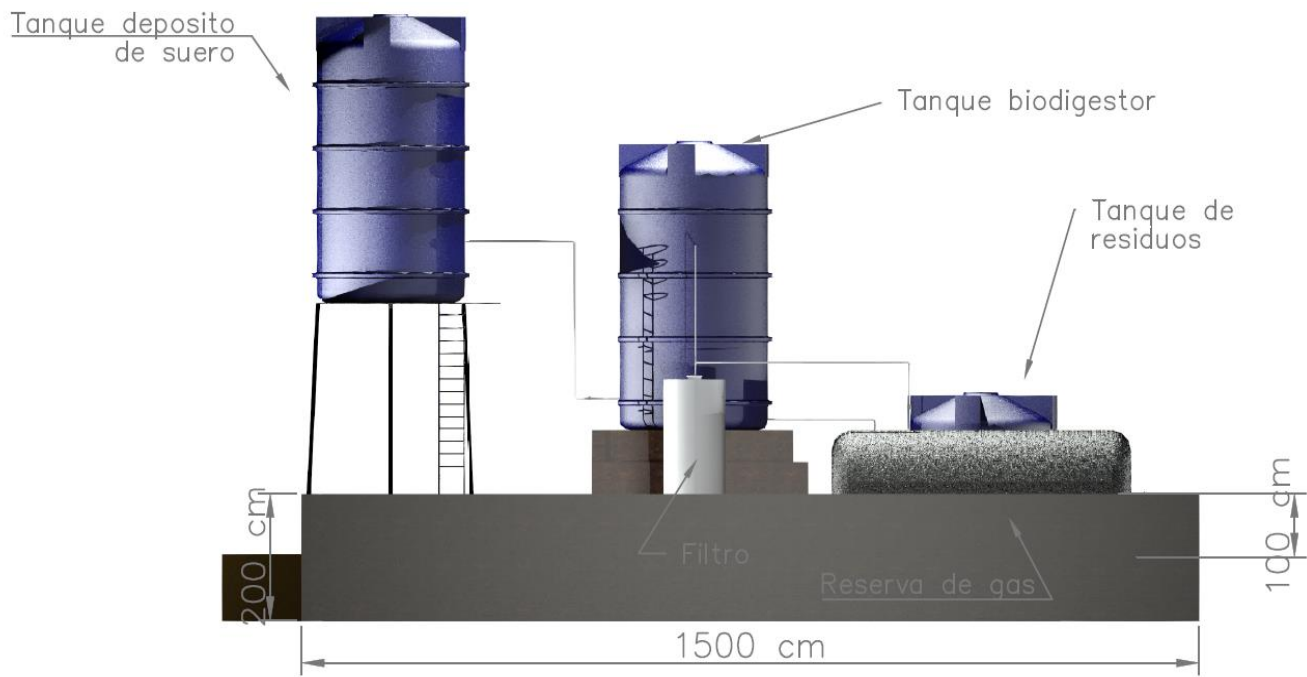
$$V = 22.18 \text{ cm}^3$$

Esto nos indica que el tanque del biodigestor estaría cumpliendo con los requerimientos de su capacidad

2.9.7 Diseño del biodigestor

El diseño del biodigestor se realizó en el programa AutoCAD, las diferentes vistas del diseño se pueden observar en el Anexo 6.

Figura 2 - 23. Diseño biodigestor AutoCAD



Fuente. Autor

Capítulo 3. Evaluación técnico-económica del biodigestor

El análisis financiero de un proyecto está asociado de la mano con la empresa con la toma de decisiones que sean factibles al momento de realizar el proyecto donde involucre el aporte financiero para su desarrollo inicial. Este análisis se divide en costos directos e indirectos como el diseño, ejecución y su posterior montaje del mismo.

Esta evaluación económica constituye la parte final del análisis de factibilidad del proyecto de inversión, por lo cual, se recopila la información generada de los estudios en los capítulos anteriores, esto conlleva a evaluar económicamente el valor del dinero a través del tiempo, esto con el fin de medir la eficiencia de la inversión y su rentabilidad o rendimiento durante su vida establecida.

3.1 Estudio de factibilidad

Es la recopilación de datos que nos dará la información de la propuesta del diseño del Biodigestor para que de esta manera nos sirva de base, para una buena decisión en relación a su desarrollo, y estudio para su implementación. La factibilidad se divide en tres aspectos:

3.1.1 Estudio de Mercado

Se analizará la oferta y demanda de los precios del proyecto. Se Mirarán las políticas actuales y los procedimientos que se deben llevar a cabo para la realización de estrategias comerciales, mediante el conocimiento de los siguientes aspectos:

- a. Comercialización del producto o servicio del proyecto.
- b. Observar si el precio del producto se encuentra consolidado para que de esta manera se pueda analizar y evaluar los datos correspondientes y contar cómo es el proceso de comercialización.

Este sistema de producción de biogás será dirigido a varias granjas y empresas para que de esta manera se pueda realizar un tratamiento de residuos orgánicos ya se han, agropecuarios o industriales y traerá beneficios ambientales económicos y sociales.

Localización del mercado: Esta dirigido a empresas y granjas dentro del Municipio de combita Departamento de Boyacá que perteneces a estratos B y C ya que pertenecen a este sector demográfico, este mercado estará constituido por gente que tenga la necesidad de implementar esta tecnología que aprovecha los recursos propios del medio ambiente para que de esta manera se pueda producir gas.

Segmentación del mercado: Va dirigido a la gente entre las edades 35 a 60 años con estado civil (casados, solteros, viudos) que estén dispuestos a invertir en la auto sostenibilidad energética de la energía renovable. con unos ingresos mensuales de un salario mínimo.

Competencia: Nuestro principal competidor serán los distribuidores de gas como rayo gas y gas país, que abastecen el combustible a las respectivas veredas del municipio de combita Boyacá.

a. Aspecto Técnico

La incorporación de una planta de biogás permitirá el aprovechamiento a un 100 % de los residuos de la elaboración del queso, dando como resultado la explotación del potencial energético con la producción de biogás de 7844 m³ biogás/ año, el cual se podrá utilizar para la generación de energía eléctrica por medio de un generador de turbina de gas, aprovechado este recurso.

b. Aspecto Económico

Dentro del análisis realizado se demuestra que el uso de biogás será de una gran ayuda en la parte económica de la empresa, ya que reducirá los altos montos económicos generados por el consumo eléctrico y de diésel para la producción de derivados de la leche, tomado en cuenta que la generación de biogás podrá ser de 7844 m³ biogás/ año.

c. Aspecto Ambiental

El diseño de una planta de biogás permite reducir el impacto ambiental que provocan los residuos del proceso de la elaboración del queso.

Entre las ventajas que nos proporciona la energía generada por el biogás tenemos:

- Disminuye la degradación del suelo.
- Mejora el equilibrio ecológico mejora de la salud pública.
- Control de insectos y vectores.
- Contribuye al desarrollo sustentable.
- Ayuda a reducir el impacto de la crisis energética.
- Higienización y salud: control de parasitismo

3.2 Financiero

Mirar los recursos económicos y financieros con los cuales se van a llevar a cabo el proyecto como el capital, requerimiento total de activos, modalidad y fuentes de financiamiento.

- a. Necesidades totales de capital: Requerimiento total de activos, modalidad y fuentes de financiamiento, amortización de la deuda, inversión anual durante la vida del proyecto, depreciación y amortización de la inversión

- b. Estructura de costo con financiamiento
- c. Flujo de caja con financiamiento
- d. Ingresos totales anuales

3.2.1 Inversión inicial

Para el cálculo de esta inversión inicial del proyecto se realiza una estimación de materiales ver tabla 3-31 con datos importantes para su ejecución como elementos implementos a utilizar en el proyecto, se tomaron como referencia precios del mercado y de acuerdo a las necesidades de la empresa.

Tabla 3 - 31. Costos de la inversión y diseño.

| LISTA DE RUBROS Y PRECIOS | | | | | |
|---------------------------|--|--------|----------|-----------------|----------------------|
| Ítem | Material | Unidad | Cantidad | Precio unitario | Precio Total |
| 1 | Tanque de 20000 | Litros | 1 | \$ 5.200.000 | \$ 3.130.000 |
| 2 | Tanque de 16000 | Litros | 1 | \$ 1.800.000 | \$ 1.800.000 |
| 3 | Plástico invernadero 8 micras | Metros | 18 | \$ 45.000 | \$ 780.000 |
| 4 | Codo de 65 mm | mm | 5 | \$ 3.000 | \$ 12.000 |
| 5 | Acople 1" | Pulg. | 4 | \$ 3.000 | \$ 12.000 |
| 6 | Acople macho 1" | Pulg. | 2 | \$ 3.000 | \$ 6.000 |
| 7 | Adaptador hembra | Mm | 4 | \$ 3.000 | \$ 14.000 |
| 8 | Válvula de regulación de bola galvanizada ½ | Pulg. | 4 | \$ 30.000 | \$ 120.000 |
| 9 | Silicona de alta resistencia temperatura hasta 200°C | Pieza | 4 | \$ 10.000 | \$ 20.000 |
| 10 | Estructura soporte biodigestor | Pieza | 1 | \$ 350.000 | \$ 350.000 |
| 11 | Generador eléctrico de biogás 10 kW | Pieza | 1 | \$ 2.000.000 | \$ 2.000.000 |
| 12 | Adecuación de zona instalación | Pieza | 1 | \$ 250.000 | \$ 250.000 |
| 13 | Tubo galvanizado ½ | m | 10 | \$ 20.000 | \$ 200.000 |
| 14 | Manguera de presión | m | 10 | \$ 20.000 | \$ 200.000 |
| 15 | Mano de obra excavación | - | 1 | \$ 250.000 | \$ 250.000 |
| TOTAL | | | | | \$ 10.000.000 |

Fuente: Autor

Índices de evaluación del proyecto: Se puede escoger uno o varios entre Valor Presente Neto, Tasa Interna de Retorno, Periodo de Recuperación del Capital, Relación Costo-Beneficio.

En este estudio se elabora el flujo de caja, donde se calculan el VAN y TIR del proyecto el cual nos permite observar su comportamiento a futuro.

3.2.2 Flujo de caja

Para elaborar este flujo neto de fondos se debe establecer el desenvolvimiento de la empresa, los cuales se reflejan en datos como inversión inicial, ingresos y egresos ver tabla 3-32.

Se realizó un flujo de caja con la cual se presenta una idea más clara del proyecto como los ingresos y egresos que se presentan con una estimación de los primeros 5 años.

Tabla 3 - 32. Flujo de caja

| FLUJO DE INGRESOS | | FLUJO DE EGRESOS | | FLUJO DE EFECTIVO NETO | |
|-------------------|---------------|------------------|---------------|------------------------|---------------|
| Año | Valor | Año | Valor | Año | Valor |
| 0 | 32.520.000 | | | | \$ 32.520.000 |
| 1 | \$ 62.500.000 | 1 | \$ 44.190.000 | 1 | \$ 18.310.000 |
| 2 | \$ 77.500.000 | 2 | \$ 49.590.000 | 2 | \$ 27.910.000 |
| 3 | \$ 86.500.000 | 3 | \$ 49.590.000 | 3 | \$ 36.910.000 |
| 4 | \$ 86.500.000 | 4 | \$ 49.590.000 | 4 | \$ 36.910.000 |
| 5 | \$ 86.500.000 | 5 | \$ 49.590.000 | 5 | \$ 36.910.000 |

Fuente. Autor

3.2.3 Indicadores financieros

3.2.3.1 Valor presente neto VPN

Es un método el cual ayuda a evaluar el proyecto a realizar en largo plazo, ya que nos permite determinar si es viable financieramente, obteniendo una idea del gasto o pérdidas del mismo [63].

Con este método se puede definir la aceptación o el rechazo del proyecto de acuerdo a los siguientes criterios evaluativos.

- d. Si el VPN es < 0 , el proyecto no es aceptable para su ejecución.
- e. Si el VPN es $= 0$, el proyecto no generará ganancias ni pérdidas es indiferente.
- f. Si el VPN es > 0 , el proyecto es aceptable y puede ser ejecutado.

¿Cómo se calcula el Valor Presente Neto?

Para calcular este valor presente neto, se implementa la siguiente ecuación.

Ecuación 15. Valor Presente Neto - VPN

$$VPN = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+k)^t} = -I_o + \frac{F1}{(1+k)} + \frac{F2}{(1+k)} + \frac{Fn}{(1+k)}$$

Donde:

- a. Inversión inicial previa (I_0): es el monto o valor del desembolso que la empresa hará en el momento inicial de efectuar la inversión.
- b. Flujos netos de efectivo (F_t): representan la diferencia entre los ingresos y gastos que podrán obtenerse por la ejecución de un proyecto de inversión durante su vida útil.
- c. Tasa de descuento (k): también conocida como costo o tasa de oportunidad. es la tasa de retorno requerida sobre una inversión. Refleja la oportunidad perdida de gastar o invertir en el presente.
- d. Número de periodos que dure el proyecto (n).

Encontramos el siguiente valor para este proyecto: VAN= \$ 68.228.839

El Valor Actual Neto (VAN) es positivo y es un valor actual lo cual ayuda a dar garantía del proyecto, por el momento se determina viable y a continuación evaluaremos otros indicadores financieros que son de bastante importancia.

3.2.3.2 TIR o Tasa Interna de Retorno

Es uno de los métodos de evaluación de proyectos de inversión más recomendables. Se utiliza frecuentemente para analizar la viabilidad de un proyecto y determinar la tasa de beneficio o rentabilidad que se puede obtener de dicha inversión. Estrechamente ligado al VAN, el TIR también es definido como el valor de la tasa de descuento que iguala el VAN a cero, para un determinado proyecto de inversión. Su resultado viene expresado en valor porcentual.

Tabla 3 - 33. Datos formulados

| Formulación Datos | |
|-------------------|-------------------------------|
| f1= | \$ 18.310.000 |
| f2= | \$ 27.910.000 |
| f3= | \$ 36.910.000 |
| f4= | \$ 36.910.000 |
| f5= | \$ 36.910.000 |
| n= | 5 años |
| i= | 15% de Taza de interés (0,15) |
| IO= | -32.500.000 |

Fuente. Autor

VAN= \$ 68.228.839

TIR= 75%

Con lo anterior se puede observar en el cuadro anterior que los resultados del VAN se obtuvieron \$ 68.228.839 y la TIR un 75% son positivos, esto indica que, en el escenario planteado, el proyecto es rentable. Es importante tener en cuenta que el valor encontrado es muy favorable, pero la decisión final que detalla la rentabilidad del proyecto es conjunto en donde otros indicadores como el Valor Actual Neto (VAN) y la Relación Beneficio/Costo (RBC).

3.2.4 Consolidado flujo de caja

Este flujo de caja se realizó con el fin de analizar los ingresos y egresos que se utilizaría en la ejecución del proyecto, donde se hallaron los costos variables que se tuvieron en cuenta, así como costos de materiales que se necesitan en la realización del Biodigestor además la mano de obra y los costos Directos que puede traer el proyecto. En los años 3, 4 y 5 se mantienen los mismos valores ya que se puede recalcular con un efecto inflacionario teniendo en cuenta la última tasa de inflación actualizada que es la de agosto de 2021 de 3.6% aproximadamente, pero se consideró que no se aplicaría porque se parte de un escenario realista en donde se mantienen los valores y no de un escenario optimista en donde aumentan las utilidades.

En la plantilla de flujo de caja vemos varios factores positivos como es el valor de los costos de materiales, costo de mano de obra y los otros costos directos los cuales permanecen siempre constantes, de cierta medida pueden llegar a un punto en donde varían claramente, pero para las unidades estimadas no se tienen afectaciones lo cual es muy bueno para aumentar la utilidad.

Tabla 3 - 34. Plantilla flujo de caja

| | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| Ingresos de caja | \$ 62.500.000 | \$ 77.500.000 | \$ 86.500.000 | \$ 86.500.000 | \$ 86.500.000 |
| Costos de materiales | \$ 10.000.000 | \$ 12.000.000 | \$ 12.000.000 | \$ 12.000.000 | \$ 12.000.000 |
| Costo de mano de obra | \$ 500.000 | \$ 500.000 | \$ 500.000 | \$ 500.000 | \$ 500.000 |
| Otros costos Directos | \$ 500.000 | \$ 700.000 | \$ 700.000 | \$ 700.000 | \$ 700.000 |
| ventas | \$ 30.000.000 | \$ 45.000.000 | \$ 54.000.000 | \$ 54.000.000 | \$ 54.000.000 |
| cantidad | 2 | 3 | 3,6 | 3,6 | 3,6 |
| precio | \$ 15.000.000 | \$ 15.000.000 | \$ 15.000.000 | \$ 15.000.000 | \$ 15.000.000 |
| Aportes de capital | \$ 32.500.000 | \$ 32.500.000 | \$ 32.500.000 | \$ 32.500.000 | \$ 32.500.000 |
| Egresos de caja | \$ 44.190.000 | \$ 49.590.000 | \$ 49.590.000 | \$ 49.590.000 | \$ 49.590.000 |
| Compras | \$ 18.000.000 | \$ 23.400.000 | \$ 23.400.000 | \$ 23.400.000 | \$ 23.400.000 |
| Cantidad | 20 | 26 | 26 | 26 | 26 |
| Precio | \$ 900.000 | \$ 900.000 | \$ 900.000 | \$ 900.000 | \$ 900.000 |
| Transporte | \$ 400.000 | \$ 400.000 | \$ 400.000 | \$ 400.000 | \$ 400.000 |
| Costos fijos | \$ 25.790.000 | \$ 25.790.000 | \$ 25.790.000 | \$ 25.790.000 | \$ 25.790.000 |
| Sueldos | \$ 20.800.000 | \$ 20.800.000 | \$ 20.800.000 | \$ 20.800.000 | \$ 20.800.000 |
| Arriendo | \$ 1.500.000 | \$ 1.500.000 | \$ 1.500.000 | \$ 1.500.000 | \$ 1.500.000 |
| luz | \$ 100.000 | \$ 100.000 | \$ 100.000 | \$ 100.000 | \$ 100.000 |
| internet | \$ 120.000 | \$ 120.000 | \$ 120.000 | \$ 120.000 | \$ 120.000 |
| Teléfono | \$ 50.000 | \$ 50.000 | \$ 50.000 | \$ 50.000 | \$ 50.000 |
| Agua | \$ 80.000 | \$ 80.000 | \$ 80.000 | \$ 80.000 | \$ 80.000 |
| Flujo de mes | \$ 18.310.000 | \$ 27.910.000 | \$ 36.910.000 | \$ 36.910.000 | \$ 36.910.000 |
| Flujo acumulado | \$ 18.310.000 | \$ 46.220.000 | \$ 83.130.000 | \$ 120.040.000 | \$ 156.950.000 |

Fuente. Autor

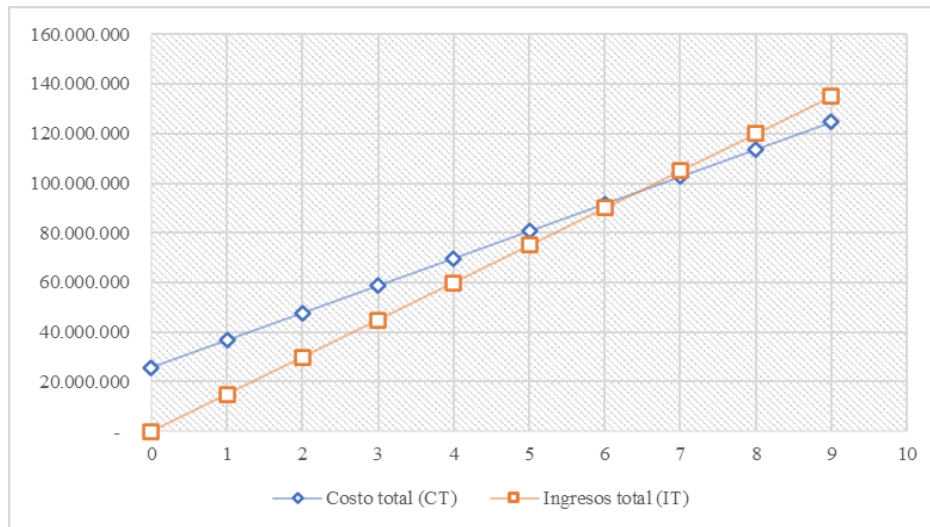
3.2.5 Punto de equilibrio

El punto de equilibrio [64] de un proyecto o empresa es cuando los ingresos cubren los gastos fijos y variables, lo que significa que si logras vender lo mismo que gastas conlleva a que no pierdes ni ganas.

Este cálculo es importante ya que permite realizar una evaluación de su rentabilidad al ejecutar o desarrollar el proyecto, de esta manera, se podrá obtener claramente cuanto se debe vender para generar una ganancia efectiva a futuro.

El establecer este valor antes de ejecutar un proyecto es de suma importancia ya que genera una proyección financiera de la idea que se quiere realizar.

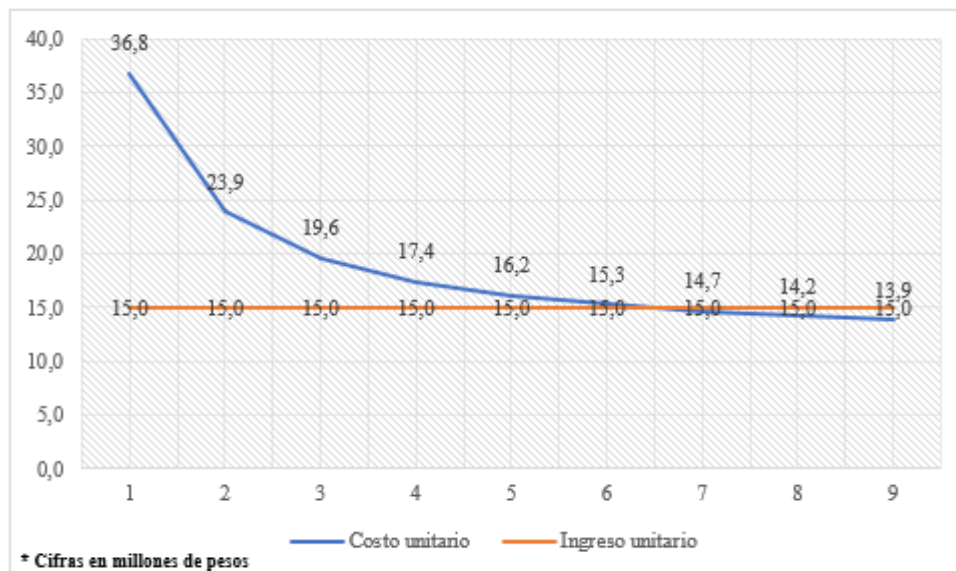
Figura 3 - 24. Punto de equilibrio



Fuente. Autor

En el siguiente proyecto se obtuvo una inversión inicial de \$ 32.520.000 con unos costos variables de \$ 11.000.000 y unos costos fijos de \$ 25.790.000 al observar que se puede realizar una venta por unidad de \$ 15.000.000 se ve que el proyecto es viable si se vendieran un poco más de los 6 Biodigestores, teniendo en cuenta que esta es una variable discreta, podemos afirmar que con 7 unidades de Biodigestores se recuperaría la inversión inicial y empezamos a obtener utilidad del proyecto, ya que si vendemos 6 unidades o menos los costos son mayores a los ingresos recibidos. En la siguiente gráfica podemos evidenciar el comportamiento tanto de los costos e ingresos, pero de forma unitaria

Ilustración 3 - 25. Costos e ingresos unitarios



Fuente. Autor

En la anterior gráfica podemos evidenciar que los costos en las primeras unidades son bastante altos e inclusive para la primera unidad era un poco más del doble en comparación con el ingreso recibido. Podemos evidenciar que a partir de la 7 unidad el costo es de 14.7 millones de pesos mientras que el ingreso se mantiene constante de 15 millones de pesos por cada unidad adicional.

Es importante tener en cuenta el grado de la pendiente como va disminuyendo, esto muestra que es importante evaluar hasta que cantidad de biodigestores se deben vender para mantener un margen de utilidad mayor al que se obtiene con una unidad inferior, no se considera malo vender 15 o 16 unidades teniendo el mismo margen de utilidad, pero si es importante tenerlo presente por la disponibilidad de recursos y la capacidad de demanda del mercado.

Conclusiones

Se diseñó un biodigestor de acuerdo con las necesidades que tiene la empresa Delilácteos San Martín para el proceso del residuo del suero, el cual, transforma este producto en biogás generando alrededor de 13.36 kWh/día. Este biogás, al ser combustionado en el generador, ayuda en la reducción significativa del 40% en el consumo de energía eléctrica tradicional de la empresa.

El consumo de energía eléctrica promedio mensual de la empresa aproximadamente de 1005 kWh/mes, lo que por día equivale a 33.5 kWh, con la generación de biogás se puede establecer un promedio del 40% de ahorro en el consumo de energía generada a través de biogás.

Se diseñó una planta de biodigestión anaeróbica tipo chino para el tratamiento de 1006 L/día de lactosuero generado por la empresa durante el proceso de elaboración de quesos, para evitar la contaminación de los suelos y tatar de solventar las necesidades eléctricas que tiene la empresa. La producción de biogás diaria es de aproximadamente de 21.49 m³, y con ella se pudiera satisfacer el 40 % de las necesidades de energía eléctrica de la Empresa.

Se diseñó un dispositivo de almacenamiento continuo del metano que permite mantener un flujo constante de biodigestión y posterior consumo del biogás. Manteniendo un continuo aprovechamiento del suero generado diariamente por la empresa.

Al realizar el diseño del biodigestor se considera que es viable de convertirse en herramienta fundamental para la empresa de Delilácteos San Martín, apoyando su sostenibilidad para el aprovechamiento del residuo generado por esta empresa, de esta manera se desarrollaría un aporte creativo en base a la responsabilidad del recurso natural.

El Valor Presente Neto (VPN) hallado en el análisis financiero, permite afirmar que es viable la compra de tecnologías limpias para generar electricidad y así lograr el autoabastecimiento. Sin embargo, esta inversión se debe realizar dentro del periodo de recuperación o retorno del capital colocado inicialmente.

Por último, se afirma que la viabilidad del proyecto quedo argumentado por el alto valor encontrado para la TIR del 75% y el VAN mencionado anteriormente, adicional, tenemos que para soportar esta decisión los flujos de caja muestran valores muy favorables donde las deducciones permanecen constantes y no son afectados a medida que aumentan las unidades, esto se convierte en un precio de venta neto creciente que contribuye en aumentar la utilidad.

Recomendaciones

Se debe concientizar a las empresas industriales para que transformen sus residuos orgánicos en energías renovables que sean sustentables, por lo cual, después de realizar análisis de estudios este proyecto es viable para su implementación.

Para futuros diseños se podrían implementar diferentes tipos de material orgánicos como purines de cerdo o ganado mezclados con el suero, lo cual podría mejorar la calidad y rendimiento de la generación de biogás.

Se recomendaría la utilización de desechos de agua residuales de la empresa, para fomentar el crecimiento de las bacterias en el interior del biodigestor el cual ayudaría en la producción del biogás.

Se recomienda realizar un estudio de consumo energético con el fin de obtener el valor máximo de generación de la planta, comprar menos energía, así como disminuir los costos de operación asociados a la producción y procurar la racionalidad y buenas prácticas.

Evaluar los pros y contras que genera tener una unidad adicional en el punto donde los costos permanecerán constantes ya que esto puede repercutir en un incremento o desbordamiento de la capacidad que tienen los costos de mano de obra directa, los costos de materiales y los otros costos directos.

Referencias Bibliográficas

- [1] «Estadísticas», *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <http://www.fao.org/statistics/es/> (accedido feb. 17, 2021).
- [2] J. Remón, M. Laseca, L. García, y J. Arauzo, «Hydrogen production from cheese whey by catalytic steam reforming: Preliminary study using lactose as a model compound», *Energy Convers. Manag.*, vol. 114, pp. 122-141, abr. 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.009.
- [3] «paper2.pdf». Accedido: feb. 10, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://users.df.uba.ar/carlosv/dov/biocombustibles/biogas-fisica+biologia/paper2.pdf>
- [4] «BD_Agrosania-c.pdf». Accedido: feb. 10, 2021. [En línea]. Disponible en: http://aqualimpia.com/PDF/BD_Agrosania-c.pdf
- [5] «Energías Renovables | Manuelita». <https://manuelita.com/manuelita-productos/energias-renovables/> (accedido feb. 10, 2021).
- [6] «Acuerdo de París y su importancia en Colombia | Centro Virtual de Negocios - CVN». <https://www.cvn.com.co/acuerdo-de-paris/> (accedido feb. 10, 2021).
- [7] «Leyes desde 1992 - Vigencia expresa y control de constitucionalidad [LEY_1715_2014]». http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html (accedido may 06, 2020).
- [8] «UPME». <https://www1.upme.gov.co/Paginas/default.aspx> (accedido may 06, 2020).
- [9] J. A. Martínez-Ruano, D. L. Restrepo-Serna, E. Carmona-García, J. A. P. Giraldo, G. Aroca, y C. A. Cardona, «Effect of co-digestion of milk-whey and potato stem on heat and power generation using biogas as an energy vector: Techno-economic assessment», *Appl. Energy*, vol. 241, pp. 504-518, may 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.005.
- [10] T. H. Ergüder, U. Tezel, E. Güven, y G. N. Demirer, «Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors», *Waste Manag.*, vol. 21, n.º 7, pp. 643-650, ene. 2001, doi: 10.1016/S0956-053X(00)00114-8.
- [11] A. J. Mawson, «Bioconversions for whey utilization and waste abatement», *Bioresour. Technol.*, vol. 47, n.º 3, pp. 195-203, ene. 1994, doi: 10.1016/0960-8524(94)90180-5.
- [12] *Biogás: 10 casos de éxito en el sector industrial: Industrias: curtiembre, láctea, cárnica, golosinas, cervecera, destilería de whisky, vitivinícola, procesamiento de verduras y frutas y papelera*. Francisco M. Hernández, 2015.
- [13] «Producción | Fedegan». <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/produccion-0> (accedido mar. 06, 2021).
- [14] «2019-03-30 Cifras Sectoriales.pdf». Accedido: mar. 06, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://sioc.minagricultura.gov.co/SICLA/Documentos/2019-03-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- [15] «Biogás Relleno Doña Juana», *Biogás Relleno Doña Juana*. <http://www.biogas.com.co/> (accedido abr. 19, 2021).
- [16] «Decreto 3683 de 2003 - EVA - Función Pública». <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=11032> (accedido mar. 06, 2021).

- [17] «36864-Decreto-2469-02Dic2014.pdf». Accedido: mar. 06, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23517/36864-Decreto-2469-02Dic2014.pdf>
- [18] «Energía Eléctrica - Ministerio de Minas y Energía GM». <https://www.minenergia.gov.co/energias-renovables-no-convencionales> (accedido mar. 06, 2021).
- [19] «36632-Decreto-1623-11Ago2015.pdf». Accedido: mar. 06, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23517/36632-Decreto-1623-11Ago2015.pdf>
- [20] «resolucion-045-minminas.pdf». Accedido: mar. 06, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.incp.org.co/Site/2016/info/archivos/resolucion-045-minminas.pdf>
- [21] «Creg030-2018.pdf». Accedido: mar. 06, 2021. [En línea]. Disponible en: [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c2c4474f05258243005a1191/\\$FILE/Creg030-2018.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c2c4474f05258243005a1191/$FILE/Creg030-2018.pdf)
- [22] «d1-res_631_marz_2015.pdf». Accedido: abr. 13, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf
- [23] «Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf». Accedido: may 27, 2021. [En línea]. Disponible en: http://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf
- [24] P. L. H. McSweeney, Ed., «Whey processing», en *Cheese Problems Solved*, Woodhead Publishing, 2007, pp. 163-165. doi: 10.1533/9781845693534.163.
- [25] R. A. P. Huertas, «LACTOSUERO: IMPORTANCIA EN LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS», n.º 62, p. 16, 2009.
- [26] M. Acosta Pabuena y J. Pasqualino, «Potencial de uso de biogás en Colombia», *Tek. Rev. Científica*, vol. 14, n.º 2, p. 27, dic. 2014, doi: 10.25044/25392190.468.
- [27] R. A. P. Huertas, «Digestión Anaerobia de Lactosuero: Efecto de Altas Cargas Puntuales», n.º 63, p. 10, 2010.
- [28] «Procesos para la elaboración de productos lácteos», p. 38.
- [29] «Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos | Revista Científica de FAREM - Estelí», Accedido: mar. 06, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://revistasnicaragua.net.ni/index.php/RCientifica/article/view/4083>
- [30] «Metanización». <http://www.maestrocompostador.es/Metanizacion/Metanizacion.html> (accedido mar. 06, 2021).
- [31] «as400s.pdf». Accedido: mar. 08, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- [32] Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y R. A. Parra Huertas, «Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria», *Prod. Limpia*, vol. 10, n.º 2, pp. 142-159, 2015, doi: 10.22507/pml.v10n2a13.
- [33] D. O. Bennardi, «DIGESTIÓN ANAERÓBICA: OBTENCIÓN DE BIOGÁS», p. 10.
- [34] «luisoctaviogonzalezsalcedo.20121.pdf». Accedido: mar. 08, 2021. [En línea]. Disponible en:

- <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/10762/luisoctaviogonzalezsalcedo.20121.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [35] «WEBER et al 2012. Producción de biogás en México.pdf». Accedido: mar. 29, 2021. [En línea]. Disponible en: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/WEBER%20et%20al%202012.%20Producci%C3%B3n%20de%20biog%C3%A1s%20en%20M%C3%A9xico.pdf
- [36] R. Rajinikanth *et al.*, «Experimental and modeling investigations of a hybrid upflow anaerobic sludge-filter bed (UASFB) reactor», *Water Sci. Technol.*, vol. 58, n.º 1, pp. 109-117, jul. 2008, doi: 10.2166/wst.2008.342.
- [37] K. Yang, Y. Yu, y S. Hwang, «Selective optimization in thermophilic acidogenesis of cheese-whey wastewater to acetic and butyric acids: partial acidification and methanation», *Water Res.*, vol. 37, n.º 10, pp. 2467-2477, may 2003, doi: 10.1016/S0043-1354(03)00006-X.
- [38] J. Ra, «CARACTERÍSTICAS DE LA HIDRODINÁMICA DE UN BIORREACTOR INDUSTRIAL TIPO TANQUE AGITADO», vol. 13, n.º 3, p. 18, 2014.
- [39] Prof. María Teresa Varnero Moreno, «MANUAL DE BIOGÁS». <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf> (accedido mar. 08, 2021).
- [40] C. F. Rodríguez, E. J. M. Torres, A. M. Palao, y X. G. Barrios, «Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrógeno. Revisión bibliográfica», *Rev. ION*, vol. 29, n.º 1, Art. n.º 1, jul. 2016, doi: 10.18273/revion.v29n1-2016004.
- [41] A. E. Bainotti, B. Estebanez, H. Nagadomi, y N. Nishio, «Production of vitamin B12 in an upflow anaerobic filter continuous reactor using *Acetobacterium* sp.», p. 6.
- [42] «script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf». Accedido: may 17, 2021. [En línea]. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf
- [43] «21468-73326-1-PB.pdf». Accedido: may 28, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/34242/21468-73326-1-PB.pdf?sequence=1>
- [44] *Methane generation from human, animal and agricultural wastes : report.* 1977. Accedido: may 29, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://portals.iucn.org/library/node/21220>
- [45] «Alaiab – Alianza Latinoamericana de Asociaciones de la Industria de Alimentos y Bebidas». <https://alaiab.org/wp/> (accedido may 29, 2021).
- [46] «Bioenergy International», *Bioenergy International*. <https://bioenergyinternational.com/> (accedido may 29, 2021).
- [47] F. M. Hernández, *Producción de biogás con suero de queso: Tratamiento y generación de energía renovable a partir de lactosuero*. Francisco M. Hernández, 2015.
- [48] «Bienvenido a Fairview Swiss Cheese». <http://www.fairviewswisscheese.com/> (accedido may 29, 2021).
- [49] E. García Ocaña, «Diseño de una planta de tratamiento anaerobio de lactosuero fomentando la producción de biogás rico en hidrógeno», abr. 2013, Accedido: sep. 27, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/15162>

- [50] «Industria Láctea Alimenta Planta de Biogás con Suero de Leche | Fluence». <https://www.fluencecorp.com/es/case/industria-productora-lactea-alimenta-planta-de-biogas-con-suero-de-leche/> (accedido sep. 27, 2021).
- [51] «Aprovechamiento+energetico+de+lactosueros+de+queserías+y+los+residuos+de+otras+industrias+alimentarias.pdf». Accedido: sep. 27, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/10388/Aprovechamiento+energetico+de+lactosueros+de+queserías+y+los+residuos+de+otras+industrias+alimentarias.pdf?squence=1>
- [52] «De residuo a biogás: aprovechamiento del suero lácteo», *Residuos Profesional*, mar. 19, 2014. <https://www.residuosprofesional.com/de-residuo-biogas-aprovechamiento-del-suero-lacteo/> (accedido sep. 27, 2021).
- [53] «Tarifas-EBSA-ABRIL-2021.jpg (801×1062)». <https://www.ebsa.com.co/wp-content/uploads/Tarifas-EBSA-ABRIL-2021.jpg> (accedido may 16, 2021).
- [54] «Biogás. Producción diaria». <http://www.mailxmail.com/curso-produccion-biogas-construccion-biodigestor/biogas-produccion-diaria> (accedido ago. 04, 2021).
- [55] A. Wellinger, J. Murphy, y D. Baxter, *The biogas handbook: science, production and applications*. 2013.
- [56] I. B. Noguera, «Reactores de flujo pistón», *Ingeniería Química Reviews*. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/11/reactores-de-flujo-piston.html> (accedido nov. 13, 2021).
- [57] L. S. Larrota, L. U. García, L. G. Torres, y C. Z. Mejía, «Análisis de la eficiencia de reactores UASB en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales», *DYNA*, vol. 86, n.º 209, Art. n.º 209, abr. 2019, doi: 10.15446/dyna.v86n209.70332.
- [58] «Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction de Steinhauser, Angelika: Very Good Hardback (2010) | WorldofBooks». <https://www.iberlibro.com/Biogas-Waste-Renewable-Resources-Introduction-Steinhauser/30607481584/bd> (accedido ago. 04, 2021).
- [59] B. Campos Cuní, «Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino», *Rev. Cienc. Téc. Agropecu.*, vol. 20, n.º 2, pp. 37-41, jun. 2011.
- [60] R. Van, «Mecanica de Materiales, 5ta Ed. Beer•Johnston•DeWolf•Mazurek McGraw Hill», Accedido: ago. 04, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/34453780/Mecanica_de_Materiales_5ta_Ed_Beer_Johnston_DeWolf_Mazurek_McGraw_Hill
- [61] «GENERADOR ELECTRICO DIESEL PRG20L».
- [62] «[PDF] Camino Fernandez - Revalorización del lactosuero mediante obtención de energía por biodigestión de la lactosa. - Free Download PDF». https://nanopdf.com/download/camino-fernandez-revalorizacion-del-lactosuero-mediante-obtencion-de-energia-por_pdf (accedido oct. 02, 2021).
- [63] «¿Cómo calcular el valor presente neto? Ejemplos», *Rankia*, 15:10 300d. C. <https://www.rankia.cl/blog/analisis-ipsa/3892041-como-calcular-valor-presente-neto-ejemplos> (accedido nov. 20, 2021).

- [64] «Punto de equilibrio de una empresa: ¿qué es y cómo calcularlo?», *Rock Content - ES*, mar. 20, 2019. <https://rockcontent.com/es/blog/punto-de-equilibrio/> (accedido nov. 23, 2021).