

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ELEVACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA DESTILERÍA “8 DE MARZO” A PARTIR DEL
APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUALES VINAZA-CACHAZA.**

Tesis presentada en opción al título académico de Máster en Eficiencia Energética

Ing. Julio César Borrero Neninger

HOLGUÍN 2021

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ELEVACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA DESTILERÍA “8 DE MARZO” A PARTIR DEL
APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUALES VINAZA-CACHAZA.**

Tesis presentada en opción al título académico de Máster en Eficiencia Energética

Autor: Ing. Julio César Borrero Neninger. PA

Tutor: Dr. C. Rolando Esteban Simeón Monet. P.T

HOLGUÍN 2021



DEDICATORIA

A toda mi familia que de una manera especial me han dado fuerzas para salir victorioso, lograr mis sueños y darme paso en la vida.

A todos mis amigos que me ayudaron en el transcurso de la carrera.

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia por alentarme, brindarme su apoyo y cariño.

A mi tutor, por hacer un espacio en su limitado tiempo y brindarme su asesoría, por su confianza, por compartir sus conocimientos y experiencias en el desarrollo de este trabajo.

A todos mis compañeros y amigos; de quienes me llevo lo mejor y muy buenos recuerdos de esta etapa.

A mis profesores, por los conocimientos impartidos a lo largo de la Maestría.

A todos muchas gracias.

PENSAMIENTO

"Whatever an education is, it should make you a unique individual, not a conformist; it should furnish you with an original spirit with which to tackle the big challenge; it should allow you to find values which will be your road map through life; it should make you spiritually rich, a person who love whatever you are doing, where ever you are, whomever you are with; it should teach you what is important, how to live and how to die".

-John Taylor Gatto

RESUMEN

La eficiencia energética de una empresa caracteriza la calidad de la relación entre el consumo de portadores y su nivel de actividad. Elevar la eficiencia energética supone encontrar la forma de gestionar y limitar el crecimiento del consumo, a partir de la utilización de tecnologías que requieren una menor cantidad de energía para conseguir el mismo rendimiento o realizar la misma función.

La destilería "8 de marzo", anexa a la Empresa Azucarera Urbano Noris en la provincia de Holguín, produce anualmente 100 000 hectolitros de alcohol. Para sostener esos niveles productivos consume alrededor de 2 523 290 litros de fuel oil y 818 916 kW/año del sistema electroenergético nacional. En ese período genera cerca de 270 000 m³ de vinaza, que junto a las cerca de 20 000 toneladas de cachaza procedentes del central constituyen residuos altamente contaminantes que provocan el mayor daño ambiental de la producción sucro alcoholera. Desde el punto de vista energético, estos residuos orgánicos tienen un alto potencial, cuyo aprovechamiento representa la mayor contribución a la sostenibilidad de estas producciones.

La investigación se orientó hacia la obtención de una tecnología para la producción de energía con residuales vinaza-cachaza. La digestión anaerobia para la obtención de biogás se considera una alternativa viable, con antecedentes en la disminución de la carga contaminante de producciones pecuarias y residuales de algunas industrias en el país, pero limitada experiencia en su aplicación con fines energéticos. En la industria azucarera existen estudios de mezclas de residuos, pero solo dos instalaciones en funcionamiento.

Se decidió emplear equipos de funcionamiento continuo para la producción de biogás, para lo cual se seleccionaron los reactores anaeróbicos de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés). Se estableció el pre-tratamiento de la Cachaza a partir del empleo simultáneo del tratamiento alcalino y térmico, aspecto sin precedente en la literatura especializada. Se diseñó una etapa de post-tratamiento para agotar los componentes contaminantes de los residuos e incrementar la producción específica de biogás, lo que constituye un aporte al diseño de instalaciones de este tipo en el país.

La planta diseñada está compuesta por: dos tanques de recepción (uno para cada residuo) y un tanque de premezclado (pretratamiento), cinco reactores UASB (tres de tratamiento y dos de post-tratamiento). Esta propuesta constituye una variación de los diseños utilizados en Cuba hasta el momento. Los resultados evidencian la viabilidad técnica y económica de la instalación, y las potencialidades para cubrir totalmente la demanda de combustible fósil en la producción de alcohol.

ABSTRACT

The energy efficiency of a company characterizes the quality of the relationship between the consumption of carriers and their level of activity. Raising energy efficiency means finding a way to manage and limit consumption growth, based on the use of technologies that require less energy to achieve the same performance or perform the same function. The "8 de Marzo" distillery, attached to the Urbano Noris Sugar Company in Holguín province, produces 100,000 hectoliters of alcohol annually. To sustain these production levels, it consumes around 2,523,290 liters of fuel oil and 818,916 kW / year from the national electrical energy system. During this period, it generates about 270,000 m³ of vinasse, which together with the nearly 20,000 tons of cachaça from the plant constitute highly polluting waste that causes the greatest environmental damage from sugar-alcohol production. From the energy point of view, these organic wastes have a high potential, the use of which represents the greatest contribution to the sustainability of these productions. The research was oriented towards obtaining a technology for the production of energy with residual vinasse-cachaça. Anaerobic digestion to obtain biogas is considered a viable alternative, with a history of reducing the pollutant load of livestock and residual productions of some industries in the country, but limited experience in its application for energy purposes. In the sugar industry there are studies of waste mixtures, but only two facilities are in operation. It was decided to use continuously operating equipment for biogas production, for which up-flow anaerobic reactors (UASB) were selected. The pre-treatment of Cachaça was established from the simultaneous use of alkaline and thermal treatment, an unprecedented aspect in the specialized literature. A post-treatment stage was designed to exhaust the polluting components of the waste and increase the specific production of biogas, which constitutes a contribution to the design of facilities of this type in the country. The designed plant is composed of: two reception tanks (one for each waste) and a premix tank (pre-treatment), five UASB reactors (three for treatment and two for post-treatment). This proposal constitutes a variation of the designs used in Cuba so far. The results show the technical and economic viability of the installation, and the potential to fully cover the demand for fossil fuel in the production of alcohol.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE.....	7
1.1. Estudio bibliométrico sobre el uso de la vinaza y la cachaza para la producción de biogás.	7
1.2. Biomasa cañera. Características y clasificación	10
1.2.1. Vinazas.....	11
1.2.2. Cachaza	12
1.2.3. Proceso de obtención del Alcohol Etílico	13
1.3. Tipos de Biodigestores anaerobios. Clasificación.....	13
1.3.1. Biodigestor de lote o Batch	13
1.3.2. Biodigestores de régimen semicontinuo.....	14
1.3.3. Biodigestores continuos	14
1.3.4. Biodigestores horizontales.....	15
1.3.5. Reactor de Mezcla Completa sin Recirculación	15
1.3.6. Reactores de contacto anaeróbico	16
1.3.7. Reactor Anaeróbico con Membrana.....	16
1.3.8. Reactores de Filtro Anaeróbico.....	17
1.4. Reactores tipo UASB	17
1.4.1. Principio de Funcionamiento	18
1.4.2. Componentes Principales.....	19
1.4.3. Ventajas y desventajas de los Reactores UASB	21
1.5. Principales características del Biogás	22
1.5.1. Aplicaciones del Biogás	23
1.5.2. Factores que afectan al proceso de producción de biogás.....	24
Conclusiones Parciales del capítulo I	25
2.1 Breve caracterización y diagnóstico de la destilería “8 de marzo”	27
2.1.1 Ubicación geográfica.....	27
2.1.2 Diagnóstico de Proceso de la destilería “8 de marzo”.....	28
2.2 Propuesta tecnológica para el diseño de una planta de Biogás.	29
2.3 Fase 1. Identificación de la tecnología para el diseño.	31
2.3.1 Estudio básico (o conceptual) para la selección de la planta de biogás.....	31

2.3.2	Clasificación y selección de los residuales que se utilizarán para el funcionamiento de la planta de biogás.....	31
2.3.3	Definición de la tipología de la Planta.....	31
2.4	Fase 2. Elaboración de la documentación del diseño.....	32
2.4.1	Cálculos para determinar los requerimientos de instalación.....	32
2.4.2	Distribución de la planta por áreas.....	35
2.4.3	Cálculos para la selección del Tanque de recepción (vinaza) TRV-01 y del Tanque de homogenización (vinaza, cal) TTRAT-01.....	36
2.4.4	Selección de Agitadores del Tanque de recepción y homogenización.....	37
2.4.5	Selección del Tanque de recepción (cachaza) TRCH-01.....	39
2.4.6	Área de digestión anaerobia y generación de biogás.....	42
2.4.7	Intercambiador de calor externo para calentamiento de sustrato (IC).....	42
2.4.8	Selección de predigestor (cilíndrico).....	45
2.4.9	Área de purificación del biogás.....	48
2.4.10	Área de almacenamiento del digestato.....	52
2.4.11	Diseño del Lecho de secado.....	54
2.4.12	Selección del gasómetro.....	56
2.4.13	Selección de los sistemas de conducción de la planta.....	59
2.5	Fase 3. Evaluación y Viabilidad del diseño.....	62
	Conclusiones parciales del capítulo II.....	62
	CAPÍTULO III. APLICACIÓN DE PROPUESTA DE TECNOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTOR ANAEROBICO.....	64
3.1	Propuesta de Diseño de Reactor Anaerobio tipo UASB.....	64
3.1.1	Cálculos geométricos del reactor.....	64
3.1.2	Cálculos de los Separadores Trifásicos.....	67
3.1.3	Cálculo de las Eficiencias de Remoción.....	69
3.1.4	Estimación de la concentración final del efluente.....	70
3.1.5	Cálculo de la Producción de Biogás.....	70
3.1.6	Cálculos de la Distribución del afluente.....	72
3.1.7	Cálculos de las tuberías de conducción del biogás.....	74
3.1.8	Cálculo de los canales de recolección del efluente (Gutters).....	75

3.1.9. Sistema de Descarga de la Cachaza	76
3.2 Funcionamiento del Reactor UASB	77
3.3 Proceso de Postratamiento Anaeróbico.....	78
3.4 Reactor UASB de Postratamiento Anaeróbico	79
3.5 Evaluación de la factibilidad técnica, socioeconómico, ambiental y energética de la planta diseñada	86
3.5.1 Evaluación de la factibilidad técnica y socioeconómica.....	86
3.5.2 Costos de los componentes y los materiales de los reactores UASB	90
3.5.3 Evaluación ambiental y energética	92
Conclusiones Parciales del capítulo III.....	96
CONCLUSIONES.....	98
RECOMENDACIONES.....	99
BIBLIOGRAFÍA.....	100
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

Desde la llegada a Cuba de los españoles, la industria azucarera ha sido uno de los principales pilares en los que se ha sostenido la economía de este país. Luego con la introducción de la locomotora de vapor en el año 1837, se incrementa la producción de azúcar, entrando Cuba en una llamada “Gran era del azúcar”, existiendo cerca de dos mil ingenios azucareros.

Las nuevas tecnologías y la modernización de los centrales produjeron la reducción de esta cantidad de ingenios, llegando a una cifra, en 1950, de 161 centrales en explotación, exportando aproximadamente 8 millones de toneladas.

La industria azucarera cubana, capaz de producir 4 millones de toneladas de azúcar, produce además grandes cantidades de residuos que mal gestionados producen altos impactos en el sector ambiental.

La biomasa cañera es concebida durante la producción del azúcar en los centrales azucareros, entre las que está el bagazo, la paja y la cachaza. La vinaza no es un residuo que se obtiene directamente de la producción del azúcar, pero sí es un residuo indirecto, generado de la destilación alcohólica de la melaza producida en el central. El bagazo y la paja son empleados mundialmente como combustibles naturales en bioeléctricas para la generación de energía y vapor.

Por otra parte, a la cachaza se le aplica un proceso de compostaje durante el cual pierde su humedad, peso y volumen facilitando su transporte y su posterior utilización en los campos como fertilizante. Las vinazas, luego de aplicarle un pretratamiento, se utilizan en la producción de levadura torula para el alimento animal, como abono para el suelo, para la producción de biogás y también se adicionan en el compostaje de la cachaza.

En la India se construyó la primera instalación a escala real para la producción de biogás utilizando la tecnología anaeróbica, en una fecha cercana a 1900, a partir de ese momento se ha incrementado el número de biodigestores, y actualmente funcionan en ese país alrededor de miles de unidades. En Exeter, Inglaterra, las lámparas de alumbrado público eran alimentadas por el gas recolectado de los biodigestores que se alimentaban de los lodos cloacales de la ciudad (Hilbert, 2017).

La digestión anaerobia es considerada en la actualidad una tecnología madura a través de la cual se genera biogás (mezcla de gases, principalmente CH₄ y CO₂, entre otros), considerado un portador energético renovable debido a la fuente de composición orgánica que le da lugar (Browne and Murphy, 2013). El biogás se caracteriza por su versatilidad, ya que puede reemplazar combustibles fósiles en la

producción de energía y calor, utilizarse de forma directa en sustitución al gas natural, y como combustible para vehículos.

El número creciente de plantas de biogás, y el incremento de la demanda mundial de bio-metano, han traído como consecuencia la necesidad de proveer costos competitivos en el suministro de los recursos bioenergéticos. En este contexto el sector del biogás está enfocado no solo a buscar nuevas biomásas (Zhang, 2013); sino también a la aplicación de tecnologías innovativas y de avanzada para mejorar la producción de biogás y la eficiencia de proceso, con un consecuente aumento de su factibilidad económica (Ward et al., 2008).

El desarrollo del biogás en Cuba, ha estado dirigido fundamentalmente al tratamiento de excretas de producciones pecuarias y residuales de algunas industrias (destilerías y cervecerías), con el fin de disminuir su carga contaminante. Sin embargo, otros residuos existentes en el país, viables para la producción de biogás han sido escasamente estudiados, y no son considerados como sustratos potenciales a pesar de su alta disponibilidad. Dentro de éstos se encuentra la cachaza, subproducto obtenido durante el proceso de fabricación de azúcar de caña en la etapa de clarificación y filtración del jugo de caña.

La cachaza se caracteriza por un alto contenido de materia orgánica (157 g kg^{-1} expresada en DQO) (Baez-Smith, 2008), así como de micronutrientes tales como nitrógeno, fósforo, calcio, potasio, magnesio, manganeso y zinc (Rouf et al., 2010), por lo que es considerado un material con un alto potencial para procesos de bioconversión. Ésta se emplea principalmente como mejorador de suelos en la agricultura cañera, en la alimentación del ganado vacuno y en la extracción de ceras y aceites para la obtención de productos de alto valor agregado (ICIDCA, 1990; Vera, 2000). Sin embargo, debido a dificultades con su manejo y transportación, en la mayoría de los centrales azucareros de Cuba, la cachaza es dispuesta directamente en los campos de caña o abandonada en el terreno. Una alternativa poco explotada es su tratamiento por digestión anaerobia (DA), con lo cual se obtendría un combustible (biogás), y un fertilizante orgánico a partir del efluente digerido. De esta forma se evitaría la emanación de sustancias volátiles durante la descomposición aerobia a cielo abierto de la cachaza (Rouf et al., 2010).

El estudio de la cachaza para procesos de DA ha sido reportado previamente a escala de laboratorio (Guillermo-Nuñez, 1986; Rouf et al., 2010; Sánchez et al., 1996), de campo (Barreto Torrella et al., 2006), y recientemente ha sido instalada la primera planta a escala industrial con una alimentación diaria de 100 t d^{-1} , en Kolhapur, estado de Maharashtra, India (Bio-CNG plant, 2014). Otros estudios realizados por

Hernández and Morales (1999) y Leite et al. (2015a) reportaron la presencia de una fase de retardo durante el procesamiento de cachaza fresca, demostrando que la fase de hidrólisis puede ser la fase controlante en la DA de la cachaza.

De acuerdo al alto contenido de materia orgánica insoluble (85%) presente en la misma, la inclusión de una etapa de pre-tratamiento previo al proceso de DA es necesaria para una conversión más eficiente de la biomasa recalcitrante. Esto posibilitaría la aceleración del proceso de hidrólisis, y por tanto mejoraría la producción de biogás (Pavlostathis and Giraldo-Gómez, 1991). Los métodos de pre-tratamientos se pueden clasificar en mecánico, físico, térmico y químico, así como métodos biológicos (Tahezadeh and Karimi, 2008). Dentro de los mencionados pre-tratamientos, el pre-tratamiento termo-alcalino, y el de agua caliente presurizada (LHW), son algunos de los más prometedores debido a la baja formación de inhibidores, a la no necesidad de usar agentes neutralizantes posterior al pre-tratamiento, y los bajos costos comparados con otros tipos de pre-tratamientos (Hendriks and Zeeman, 2009; Tahezadeh and Karimi, 2008).

Estudios precedentes aplicados a la cachaza reportan el uso de los pre-tratamientos alcalino (Ca(OH)_2 , 30°C), y térmico (50°C, 75°C y 100°C) (López, 2000). Aunque se exponen resultados favorables para el pre-tratamiento químico, cuando se trabaja hasta cargas orgánicas volumétricas de 3 kgSV $\text{m}^{-3}\text{d}^{-1}$, la productividad de biogás es similar para ambos pre-tratamientos. No se reportan estudios con la aplicación de la combinación de estos pre-tratamientos para la cachaza, lo cual se presenta como novedad en el presente trabajo.

En los países desarrollados y en vía de desarrollo, la tecnología anaeróbica cumple tres necesidades básicas: mejorar las condiciones sanitarias mediante el control de la contaminación, generación de energías renovables y suministrar materiales estabilizados como biofertilizantes para los cultivos (Moreno, 2011).

Cuba, un país del tercer mundo que utiliza el petróleo como fuente de energía, su economía se ha visto grandemente afectada, en su mayoría, por el bloqueo económico impuesto por los Estados Unidos de América, debido a esta situación, el país se encuentra en una coyuntura económica donde uno de los problemas mayores está en la generación de energía. Por estas razones se ve en la necesidad de investigar e implementar otras fuentes de energía para dar solución a la demanda de energía del país.

Entre estas medidas están la utilización de las llamadas energías renovables, como la energía solar, eólica, hidroeléctrica y energía química renovable (obtenida de la biomasa).

En Cuba, uno de los principales cultivos es la caña de azúcar, la cual es procesada y con ella se produce el azúcar, un producto de vital importancia para la alimentación, pero durante la producción de esta, se generan desechos como el bagazo, aguas residuales (más conocidos como mosto), la vinaza (se generan en las plantas alcoholeras) y la cachaza, que no son manejados ni aprovechados de forma adecuada.

La cachaza es un residuo fibroso que se genera durante la clarificación y filtración del jugo de la caña de azúcar; esta se amontona y permanecen a la intemperie durante 30-40 días para luego ser utilizada para la fertilización de suelos de caña, en la mayoría de los casos, este período se viola y se utiliza sin cumplir los parámetros técnicos necesarios para que no se dañen los suelos por el proceso de nitrificación y al medio ambiente por la emisión de CO₂ y CH₄ por el proceso de fermentación.

De similar manera, la vinaza, se vierte en lagunas de tratamiento donde se estabiliza durante un período de tiempo, disminuyendo el DQO y el DBO, pero liberando mediante una digestión aerobia metano, dióxido de carbono y ácido sulfúrico a la atmósfera.

Lo anteriormente planteado constituye uno de los impactos medioambientales que genera la industria azucarera, con una incidencia directa en la población, el manto freático y las cuencas hidrográficas, ya sea por la emisión de partículas, malos olores, emisión de gases contaminantes y residuales sólidos o líquidos que dificultan el saneamiento ambiental de los asentamientos.

Esta contaminación se produce principalmente por la mala deposición y manejo de los residuales del proceso de producción de azúcar y sus derivados, debido a la escasa educación ambiental de directivos y los colectivos laborales. Por lo que surge la necesidad de modificar este comportamiento hacia el aprovechamiento de estos residuos como biomasa para la producción de energía, abono orgánico y alimento animal.

Por lo que se define como **Problema científico**: ¿El aprovechamiento de la Vinaza y Cachaza podrá elevar la eficiencia energética en la producción de etanol y mitigar el impacto ambiental que provocan estos residuos?

Como **Objeto de investigación**, la eficiencia energética en la producción de etanol en la industria azucarera y el **Campo de Acción**, tecnologías para aprovechar el potencial energético de la vinaza-cachaza.

Hipótesis. Los factores determinantes en el aprovechamiento de los residuos vinaza-cachaza pueden integrarse en una solución tecnológica para elevar la eficiencia energética en la producción de etanol en la industria azucarera.

Objetivo General, proponer una solución tecnológica para aprovechar el potencial energético de la vinaza-cachaza y elevar la eficiencia energética en la destilería “8 de marzo” de Urbano Noris.

Objetivos específicos

1. Sistematizar los fundamentos teóricos y metodológicos existentes en torno al uso de los residuales cañeros en especial la vinaza-cachaza como fuente de energía.
2. Proponer una solución tecnológica para el diseño de reactores anaeróbicos en la destilería anexa a la Empresa Azucarera Urbano Noris en la provincia de Holguín.
3. Evaluar la tecnología propuesta en base a criterios técnicos, socioeconómicos, ambientales y energéticos.

Métodos de investigación:

Teóricos:

- Histórico – lógico: se aplica para establecer el estado del conocimiento del tema de investigación como marco teórico referencial, permitiendo conocer qué se ha investigado sobre el asunto objeto de estudio y qué metodologías y modelos se abordaron en el fenómeno estudiado. Permite apreciar las tendencias de su evolución.
- Análisis – síntesis: se utiliza para identificar los factores que influyen en el fenómeno estudiado, así como su interrelación. Se aplica para identificar las etapas que componen las diferentes metodologías clásicas de diseño, estableciendo la relación entre ellas. Permite el estudio de los líquidos residuales industriales, sus características y ventajas, el potencial energético y las particularidades de la Empresa Azucarera “Urbano Noris” del municipio del mismo nombre.
- Hipotético – deductivo: para la elaboración de la hipótesis de la investigación, precisión de las variables de la investigación y la asunción de la lógica investigativa.
- Sistémico - estructural: para conformar el aporte de la investigación como un enfoque sistémico que considere su estructura, componentes y relaciones que se dan entre ellos; así como su jerarquía y propiedades emergentes.
- Modelación: se crea un modelo científico (como instrumento de la investigación), de carácter teórico, el cual se utiliza para hacer una reproducción simplificada de la realidad. Se aplica al modelar diferentes casos en los que se utiliza el modelo de optimización en el diseño de biodigestores, aspecto que se propone en esta investigación, lo cual permite la comprobación de

la validez del modelo y su estructuración de forma coherente, observando si será adecuado o no a partir de los resultados de la modelación.

Empíricos:

- Entrevistas: método de gran utilidad en la caracterización empírica del proceso de diseño de biodigestores en el territorio. Para valorar a partir de las consultas a especialistas, la pertinencia de la propuesta de una herramienta que optimice el diseño de biodigestores para la producción de energía.
- Observación: Permitió conocer las características de los residuales industriales, su disposición y uso, así como verificar el funcionamiento de biodigestores construidos en el territorio para una mejor comprensión del tema.
- Revisión y análisis de documentos: se realizó para la recopilación y análisis de la información sobre el problema, antecedentes y estado actual, mediante la revisión de manuales para el diseño de biodigestores, así como la revisión de las normas y regulaciones que rigen dichos diseños.
- Experimentación sobre el terreno: En la constatación de las transformaciones de los directivos de la Empresa Azucarera “Urbano Noris” del municipio con el mismo nombre una vez que se les implicó en la elaboración del procedimiento para el diseño de una planta de Biogás Agroindustrial con el empleo de la vinaza-cachaza para la generación de energía.

Resultados esperados: Un diseño de biodigestores anaerobio tipo UASB para la producción de biogás a partir de la mezcla cachaza-vinaza.

Aporte teórico: Una tecnología para el montaje y puesta en funcionamiento de la planta de biogás; que garantiza la modificación de la matriz energética de la destilería “8 de marzo”.

CAPÍTULO I. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE

1.1. Estudio bibliométrico sobre el uso de la vinaza y la cachaza para la producción de biogás.

Para el desarrollo de la búsqueda usaron los softwares “Harzing's Publish or Perish 7” y “VOSviewer”. Los términos empleados para la búsqueda fueron biogás, vinaza, vinasse, stillage, cachaza, cachaça. La ecuación de búsqueda empleada para la recuperación de documentos se muestra a continuación:

biogás AND (vinaza OR vinasse OR stillage OR cachaza OR cachaça)

Como resultado de esta ecuación, se obtienen los artículos que tratan a la vinaza o la cachaza (en idioma inglés y español) para la producción de biogás. Como fuentes de información se emplearon las bases de datos Science Direct y Scielo, recuperando 159 y 21 documentos respectivamente.

Figura 1.1. Cantidad de información recuperada en las fuentes consultadas.



En la figura 1.2 muestra los 180 documentos recuperados distribuidos según el año de publicación. Del mismo se puede interpretar que en los últimos años la productividad científica referente al uso del biogás se ha incrementado significativamente.

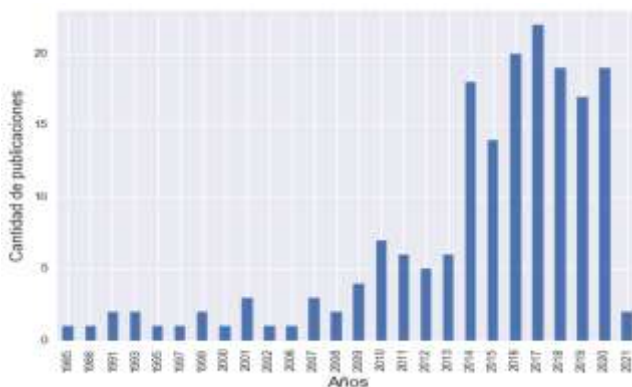


Figura 1.2. Productividad de publicaciones por años.

Las publicaciones anteriores se encuentran en 61 revistas, mostrándose a continuación las que representan el núcleo de la información.

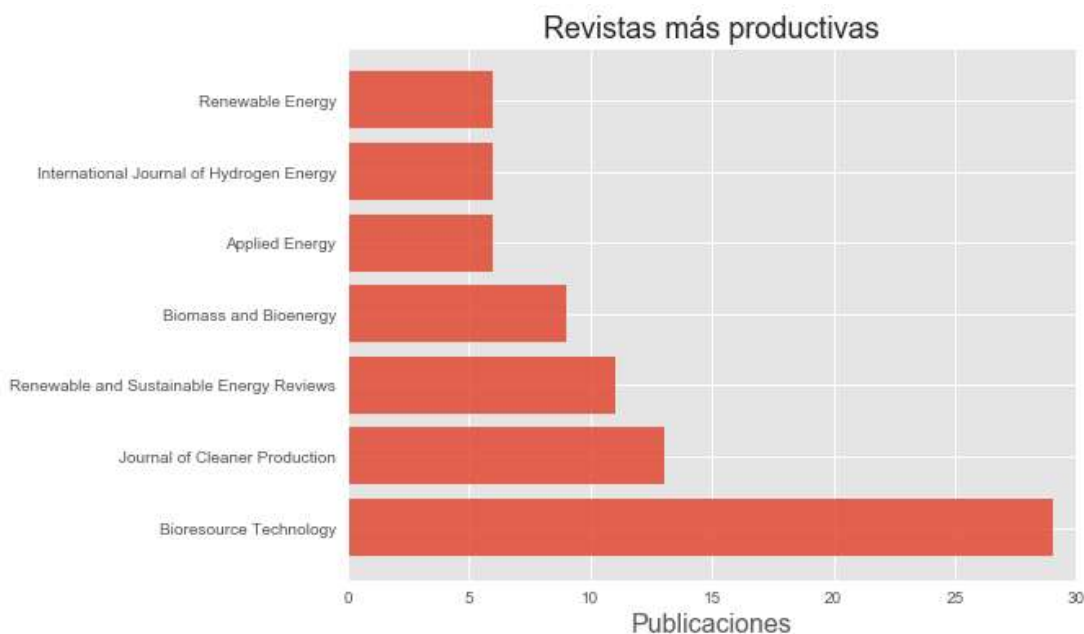


Figura 1.3. Revistas más productivas de las fuentes consultadas.

En la tabla 1.1 se puede apreciar que las revistas núcleo identificadas todas se encuentran en el primer cuartil según Scimago Journal & Country Rank, con índices H superiores a 160. Con lo que se puede concluir que además de ser las revistas más productivas en esta área presentan un alto impacto en la comunidad científica.

Tabla 1.1. Impacto de las revistas más productivas.

Revista	País	Cuartil	Índice H
Bioresource Technology	Holanda	Q1	273
Journal of Cleaner Production	Holanda	Q1	173
Renewable and Sustainable Energy Reviews	Holanda	Q1	258
Biomass and Bioenergy	Reino Unido	Q1	169
Applied Energy	Reino Unido	Q1	189
International Journal of Hydrogen Energy	Reino Unido	Q1	202
Renewable Energy	Reino Unido	Q1	258

En la figura 1.4 se presentan los investigadores más activos en esta área del conocimiento.

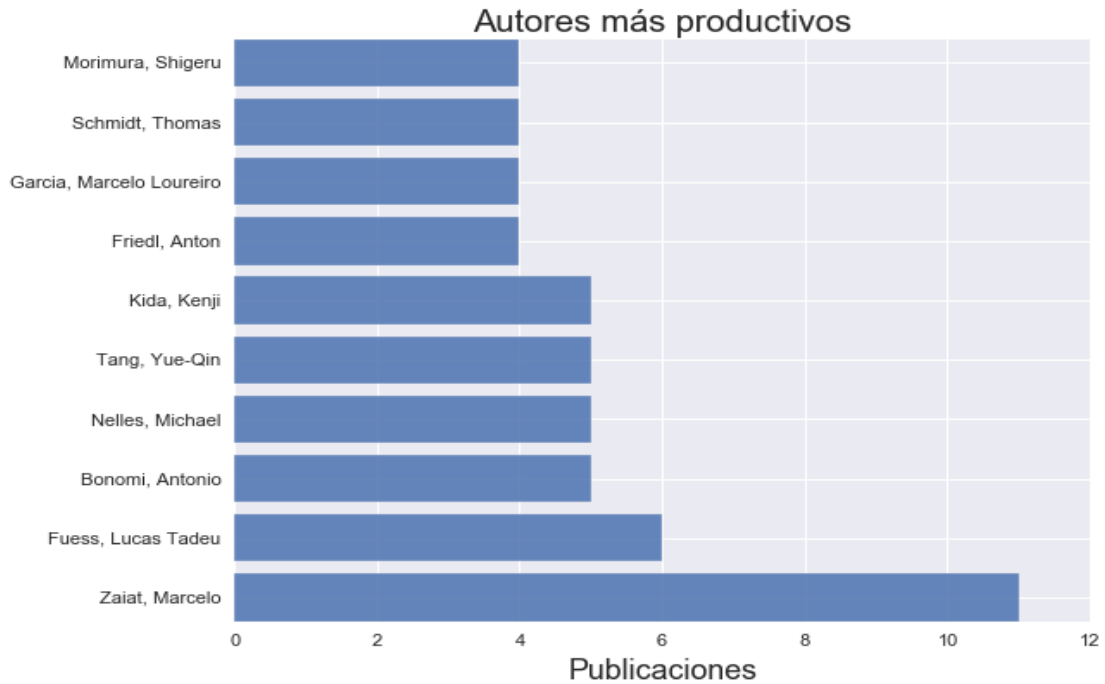


Figura 1.4. Principales autores en el estudio de biogás.

A continuación, se presentan las principales relaciones de coautoría que mantienen los autores más productivos.

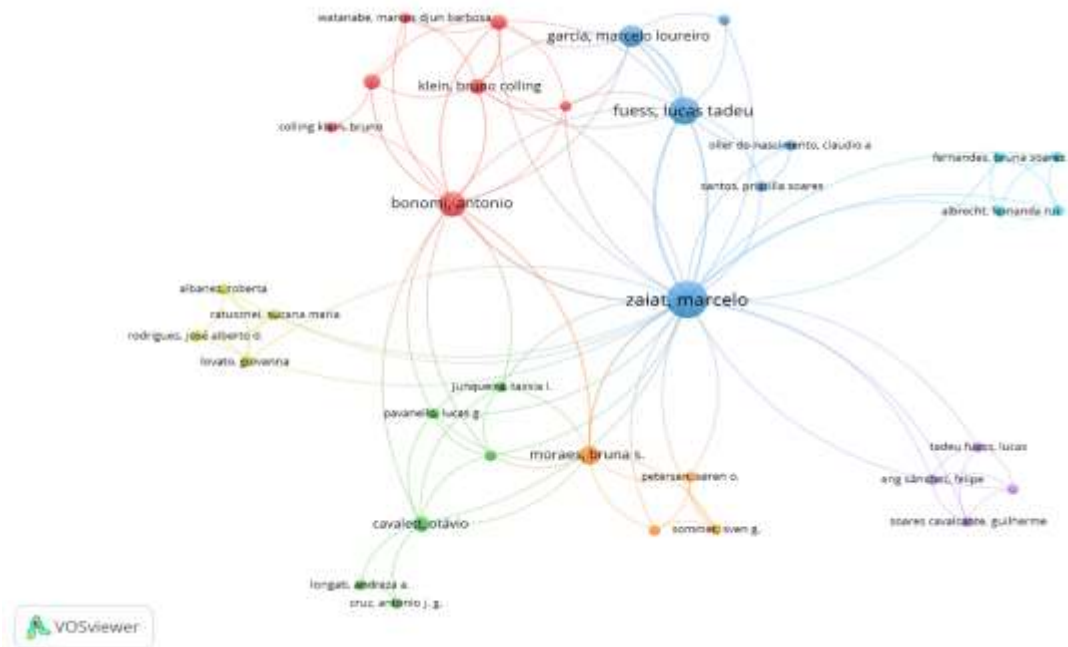


Figura 1.5. Mapa de coautoría de los autores más productivos.

Además, se realizó un análisis bibliométrico basado en el texto encontrado en el título y el resumen de los artículos. La red se muestra a continuación:

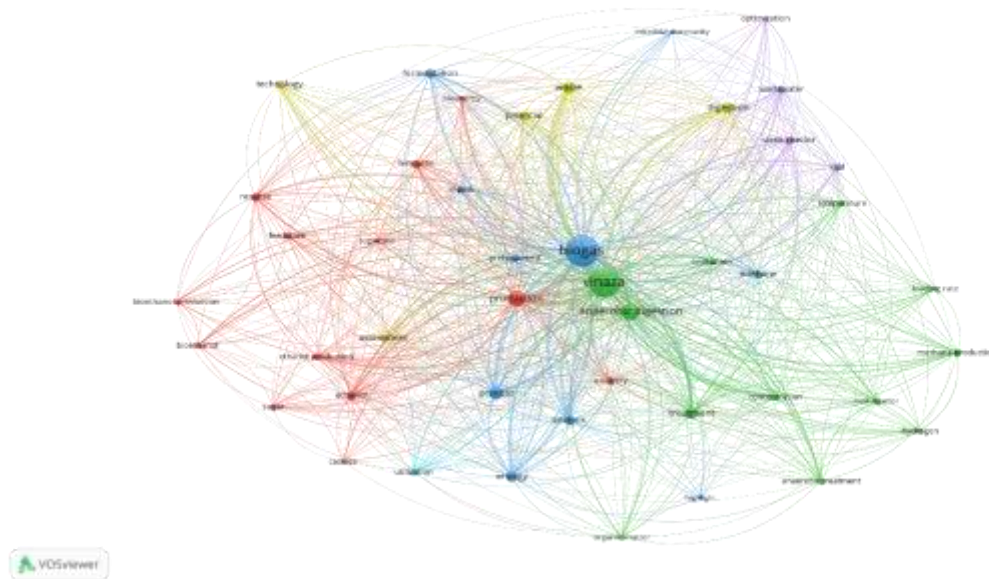


Figura 1.6. Red de los términos encontrados más relevantes.

Para lograr la red final fue necesario realizar un preprocesamiento de los términos encontrados. Del total de 6060 términos en el cúmulo de artículos, los términos relacionados con la cachaza en cualquier idioma fueron agrupados en el término “cachaza”, los términos relacionados con la vinaza en cualquier idioma fueron agrupados en el término “vinaza”, de la misma forma los términos relacionados con el biogás se agruparon en el término “biogás”. Entonces, se eliminaron del análisis los términos irrelevantes para la investigación y de los términos resultantes se seleccionaron los 50 más importantes por el número de apariciones en artículos.

De la red obtenida (Figura 1.6) se puede concluir que la gran mayoría de los artículos tratan a la vinaza para la producción de biogás y que muy pocos tienen en cuenta a la cachaza para este fin; incluso menor es la cifra cuando tomamos en cuenta artículos que traten a la vinaza y la cachaza en conjunto para la producción de biogás. Otra conclusión importante que puede ser extraída de la red es que entre los reactores más empleados para la producción de biogás se encuentran los reactores UASB (término “UASB reactor” en la red) y los reactores de lecho fluidizado (término “bed reactor” en la red) pues no fue encontrado un término referenciando a otro tipo de reactor entre los términos más importantes.

1.2. Biomasa cañera. Características y clasificación

La biomasa es cualquier tipo de materia o residuos orgánicos de origen animal o vegetal, la cual puede

convertirse en energía, considerada como una energía renovable inagotable. La biomasa se clasifica de acuerdo con las siguientes categorías:

- **Natural:** que corresponde a la que se produce espontáneamente en la naturaleza, como bosques, matorrales, hierbazales, entre otros;
- **Residual:** obtenida de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales, como los estiércoles que son usados como materia prima para la producción del biogás;
- **De plantaciones energéticas:** que corresponde a cultivos energéticos, es decir plantaciones que están dedicadas a la producción de un combustible, como la caña de azúcar, el maíz, especies de palma, entre otros.

En este trabajo los sustratos que se utilizaran para la alimentación del biodigestor son las aguas residuales, la cachaza y la vinaza, residuos procedentes del central azucarero Urbano Noris.

1.2.1. Vinazas

Las vinazas de destilerías son los efluentes líquidos que se derivan de la fermentación alcohólica de las mieles de caña de azúcar (melaza), constituye un serio problema medioambiental por el gran volumen en que son generadas entre 9 y 14 litros por litro de alcohol obtenido, por su alta carga orgánica, y por su color oscuro que las caracteriza [1].

Las vinazas en general poseen un alto contenido de materia orgánica que varía según la materia prima empleada y la eficiencia de los procesos de fermentación-destilación, que expresado en DQO oscila entre 50 y 150 $kgDQO/m^3$ y DBO entre 25 y 80 $kgDBO/m^3$ [2].

En Cuba, el principal tratamiento que se le aplica a las vinazas es vertiéndolas en lagunas de oxidación mal operadas, emitiendo gases contaminantes que ayudan a aumentar el efecto invernadero en la atmósfera, como el metano, el dióxido de carbono y el ácido sulfúrico durante la degradación orgánica, también contribuye al aumento de las poblaciones de insectos y vectores, y como resultado al desarrollo de enfermedades.

Una vez que las vinazas han permanecido un tiempo en estas lagunas, se utilizan para el fertirriego de la caña de azúcar. También, cuando no se vierten en las lagunas de oxidación, son vertidas directamente en zanjas, ríos o embalses, Figura No. 1.7.



Figura 1.7 Vertimiento de las vinazas en lagunas de oxidación.

Resultados de investigaciones llevadas a cabo a escala de laboratorio, muestran que las vinazas de destilerías, por su elevada carga orgánica, son buenos sustratos para la digestión anaeróbica, reportándose un promedio de metano de las vinazas de 240 mL CH₄/g DQO [3].

En el complejo agroindustrial Heriberto Duquesne de la provincia de Villa Clara, Cuba, se instaló una planta de biogás para el tratamiento de las vinazas, utilizando tres biodigestores tipo UASB.

1.2.2. Cachaza

La cachaza es el residuo que se elimina en el proceso de clarificación del jugo de la caña y que contiene un alto contenido de materia orgánica insoluble, (85 %) [3].

Es un material de color marrón oscuro, que presenta un 40 % de materia orgánica. Está constituido por una mezcla de fibra de caña, sacarosa, azúcares simples, cera, partículas del suelo y elementos minerales. La cachaza es fuente de fósforo (P), potasio (K), nitrógeno (N), por lo cual sirve como fertilizante para los suelos [4].

El uso más generalizado de la cachaza es como fertilizador sólido, aplicado en las plantaciones de caña luego de un proceso de compostaje, el cual es una técnica que ha sido aplicada durante años a residuos fibrosos y secos, y consiste en la descomposición biológica aerobia y la estabilización de estos residuos orgánicos. Mediante este proceso de compostaje la cachaza es capaz de disminuir su humedad, volumen y peso, y en consecuencia reducir sus costes de transportes y aplicación (Conil, Philippe).

La degradación aerobia durante el proceso de compostaje es capaz de generar metano, un gas que genera mayores impactos ambientales que el dióxido de carbono.

Investigaciones realizadas en los últimos años reportan que la producción de metano de la cachaza presenta un promedio de 221 mL CH₄/g DQO [3], un valor bajo con respecto a la vinaza. También se ha demostrado que, mediante la aplicación de un pretratamiento a la cachaza, se le puede favorecer y aumentar la biodegradabilidad, para incrementar el rendimiento de producción de metano.

1.2.3. Proceso de obtención del Alcohol Eílico

En la destilería se realiza la producción de alcohol a partir de la melaza o también conocida como miel B.

El proceso consta de tres etapas:

- Preparación del Mosto (Vinaza),
- Fermentación Continua,
- Destilación-Rectificación.

Durante la primera etapa, la miel que proviene de los almacenes se diluye y luego se filtra para eliminar las impurezas sólidas que afectan la calidad de la fermentación y del producto final. Luego el mosto a unos 80-90 °C se le agrega ácido sulfúrico para lograr un pH de entre 3,9-4 y así obtener el crecimiento de la levadura en las cubas madres.

Luego de esterilizar el mosto (eliminar un número determinado de células no deseables), se le disminuye la temperatura hasta 35 °C en un intercambiador de calor. Una parte del mosto pasa a un mezclador, se mezcla con agua tratada hasta alcanzar unos 16 °Brix y se alimenta a las cubas madres. La otra parte del mosto que no entro en el mezclador anterior, pasa a otro mezclador donde alcanza unos 24° Brix y con este se alimentan las cubas hijas o fermentadores.

La segunda etapa que es la Fermentación Continua consiste en introducir primeramente el mosto de 16 °Bx a los fermentadores, se deja reposar y se añade entre un 30-40 % el mosto de 24 °Bx y se continua con la fermentación. Así sucesivamente se continúa hasta llenar el volumen del fermentador. Mientras en este fermentador se efectúa la fermentación, se alimentan los demás fermentadores de forma continua para evitar paros en la destilería [5]. El vino fermentado es bombeado a la última etapa (Destilación), mientras que la vinaza sale de los fermentadores y se desecha.

1.3. Tipos de Biodigestores anaerobios. Clasificación

Un biodigestor o también conocido como reactor, es un sistema cerrado herméticamente en el cual se utiliza el proceso de digestión anaeróbica y que transforma la biomasa, en biogás y fertilizante llamado biol; existen diferentes tipos de biodigestores en dependencia de la biomasa a utilizar y los tipos de mezclas.

1.3.1. Biodigestor de lote o Batch

Estos biodigestores se cargan totalmente de materia prima de una vez y luego de concurrido un determinado periodo de fermentación en su interior, concluye la producción de biogás y se realiza la descarga del biol, volviéndose a llenar con una carga nueva dando inicio a otro ciclo de fermentación. Es muy utilizado en plantas donde no hay mucho personal operacional o cuando la biomasa está disponible

en intervalos de tiempo.

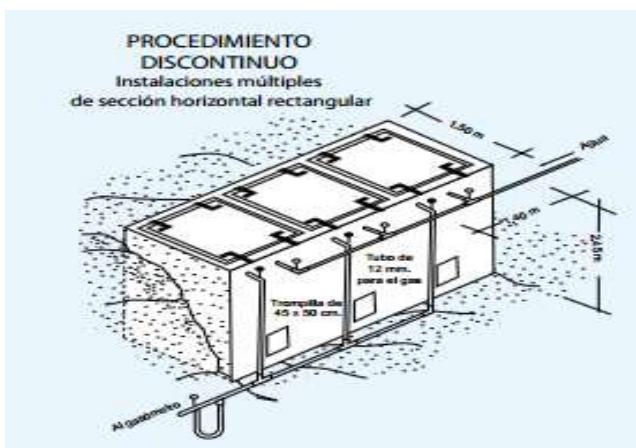


Figura 1. 8. Biodigestor discontinuo Batch. Fuente: Varnero, 2011.

1.3.2. Biodigestores de régimen semicontinuo

Estos tipos de biodigestores son los más utilizados en medios rurales o por pequeños agricultores para usos domésticos. Normalmente se cargan diariamente con volúmenes de carga que dependen del tiempo de fermentación, produciendo una cantidad constante de biogás dependiendo de su principio de funcionamiento y construcción. Los diseños más empleados son el tipo hindú o de campana flotante y el chino o de cúpula fija.

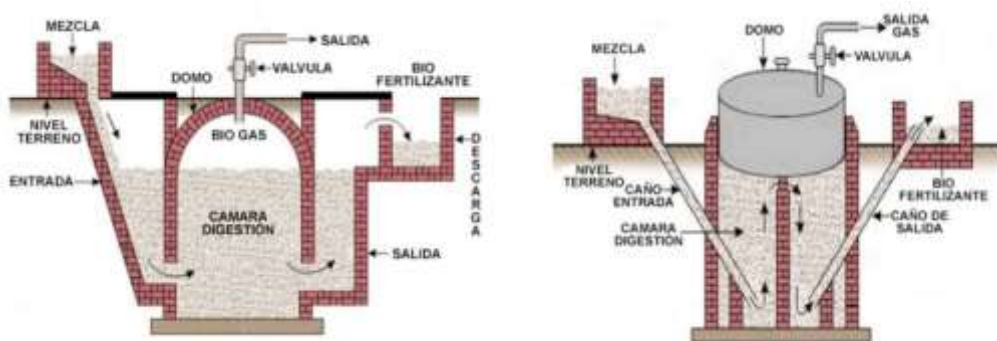


Figura 1.9. Biodigestor tipo chino (izquierda), tipo hindú (derecha). Fuente: Adaptado de (García Pérez, 2013).

1.3.3. Biodigestores continuos

La alimentación de estos digestores se realiza en un proceso ininterrumpido. Están diseñados principalmente para el tratamiento de aguas negras y sustratos prácticamente líquidos. Son plantas de grandes capacidades, tipo industrial y se requieren equipos comerciales para alimentarlos, agitándolos y proporcionándoles calefacción. Entre estos biodigestores, el más empleado es el Reactor UASB, del que

profundizaremos en el próximo epígrafe.

1.3.4. Biodigestores horizontales

Se construyen enterrados, son poco profundos y alargados, semejando un canal, que puede ser de sección transversal circular, cuadrada o en V. Son operados utilizando un régimen semicontinuo entrando la carga por uno de sus extremos y saliendo los lodos o el biol por el otro extremo.

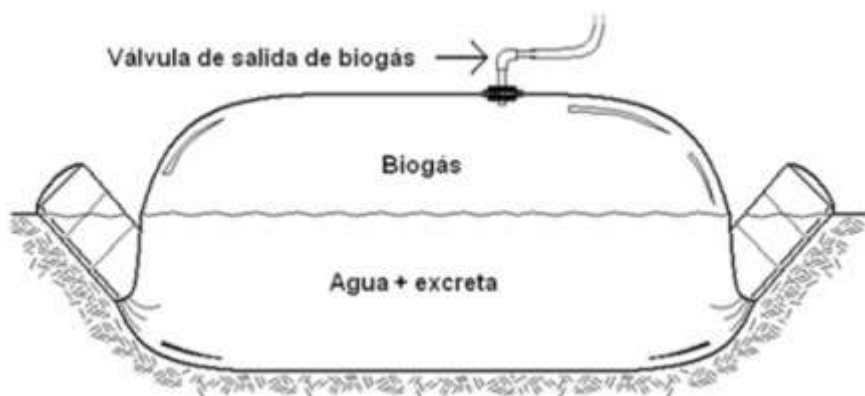


Figura 1.10. Biodigestor horizontal. Fuente: [6].

1.3.5. Reactor de Mezcla Completa sin Recirculación

Estos son reactores (Figura No. 1.11), que tienen una configuración simple cuya alimentación puede ser en régimen continuo o en ciclos de tiempo preestablecidos. Presentan equipos para lograr una agitación mecánica de la mezcla para conseguir una buena homogeneización, debido a esto las concentraciones de biomasa activa que se consiguen son limitadas, y por consiguiente las producciones de gas son bajas. También presentan la limitación de que el tiempo de retención hidráulica y el tiempo de retención de sólidos son iguales.



Figura 1.11. Reactores de Mezcla Completa a escala industrial. Fuente: Servicios Manufactureros Alcoholes Industriales.

1.3.6. Reactores de contacto anaeróbico

También son llamados reactores de mezcla completa con recirculación. Este tipo de reactor consiste en un tanque con agitación mecánica en su interior. Para eliminar la limitación técnica de que el tiempo de retención hidráulica y el tiempo de retención de sólidos son iguales, el efluente del reactor realiza una segunda etapa en la cual entra en un decantador donde se separa la que ha sido arrastradas por el efluente y se reincorpora en el reactor como lo muestra la Figura No. 1.12.

La principal limitación que presentan estos reactores es que en algunos casos la separación de la biomasa es poco eficiente, lo que provoca una pérdida de biomasa activa y la desestabilización del proceso.

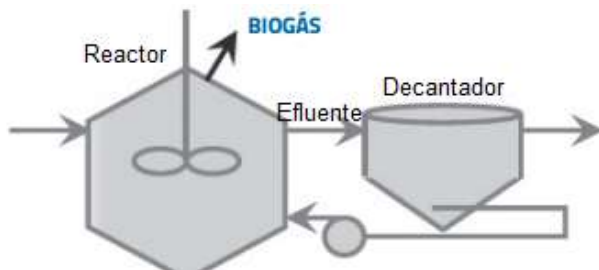


Figura 1.12. Reactor de contacto anaeróbico. Fuente: [7].

1.3.7. Reactor Anaeróbico con Membrana

Los reactores con membrana desde su desarrollo han ido desplazando a los reactores de contacto anaeróbico. La principal característica de estos reactores son las membranas que son capaces de retener por completo los sólidos suspendidos que son arrastrados por el efluente, evitando de esta forma la pérdida de la biomasa activa. Con esto el tiempo de retención de sólidos en el interior del reactor se puede incrementar.

Las limitaciones son: el elevado costo de las membranas, los costos de operación derivados de la necesidad de establecer ciclos de limpieza, tanto física como química, de las membranas y de la imposibilidad de trabajar con concentraciones muy elevadas de sólidos en el interior del reactor [7]

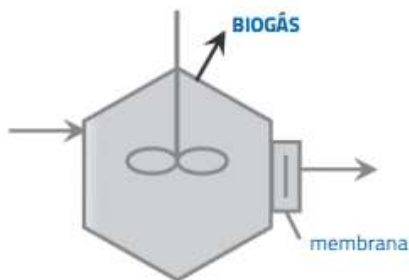


Figura 1.13. Reactor Anaeróbico con Membrana. Fuente: Fuente [7].

1.3.8. Reactores de Filtro Anaeróbico

En estos el fluido que se quiere tratar o depurar atraviesa un material de relleno que puede ser piedras, plásticos, fragmentos de arcilla y otros materiales inorgánicos de diferentes granulometrías. Los microorganismos se adhieren al material de relleno formando una biopelícula de biomasa activa, y en los intersticios existentes del material de relleno se forman flocúlos suspendidos de microorganismos, reteniendo de esta forma la biomasa.

Los reactores de filtro anaeróbico pueden presentar dos tipos de flujos ascendentes y descendentes.

La principal limitación de esta tecnología es el aumento en la caída de presión, provocado por la retención de sólidos en el interior del filtro, que en caso extremo puede llegar a colmatarse impidiendo la circulación del fluido. Esto obliga a lavados periódicos para eliminar los sólidos que producen la colmatación. Por esto los filtros no son adecuados para tratar aguas con elevado contenido de sólidos suspendidos [7].

1.4. Reactores tipo UASB

Los reactores o biodigestores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) o también conocidos como RAFA (Reactores Anaeróbicos de Flujo Ascendente) fueron inventados a mediados de los 70 en la Universidad de Wageningen (Holanda) por un equipo dirigido por el doctor Gatzke Lettinga, y se aplicó por primera vez a escala industrial en una industria azucarera en Alemania.

Son los reactores más implementados para el tratamiento anaeróbico de residuales líquidos, pertenecen a la clasificación de reactores que operan con un flujo continuo de carga, y además con flujo ascendente, es decir, el afluente entra por el extremo inferior del biodigestor, sube a través del perfil longitudinal, y sale por el extremo superior. Básicamente presentan tres zonas que se representan en la figura siguiente:

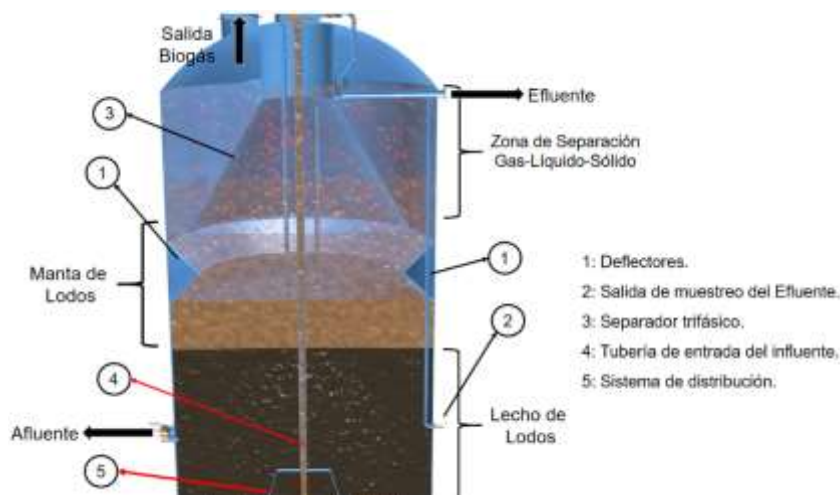


Figura 1.14. Esquema general de un reactor UASB. Fuente: Adaptado de (<http://www.eea.eng.br>).

Como se muestra en la figura la zona de Lecho de Lodos, es la zona donde los microorganismos se concentran y degradan la biomasa presente en el afluente que no es más que lodo. La manta de lodos es la zona donde se encuentran dispersos los microorganismos, y luego en la parte superior del biodigestor se encuentra la zona trifásica o zona de separación gas-líquido-sólido, donde se separan los sólidos (biol), gases (biogás) y líquidos.

Los reactores UASB tienen una forma de funcionamiento compleja y distinta a las otras tecnologías existentes, a pesar de esto son los reactores más eficientes en cuanto a tratamiento de residuales líquidos y por consiguiente son los más utilizados a nivel industrial. A continuación, se realiza una explicación de las características de estos reactores que son tendencia en el mundo.

1.4.1.Principio de Funcionamiento

El éxito de la tecnología UASB consiste en el establecimiento de un denso manto de lodo en la zona inferior del reactor, en el cual tienen lugar los procesos bacterianos que descomponen la materia orgánica. Este manto o lecho de lodo se forma por acumulación de sólidos suspendidos y bacterias en crecimiento [7].

El afluente entra por un sistema de tuberías donde un distribuidor lo reparte uniformemente hasta los inyectores que lo introducen al fondo del reactor, asegurando un llenado homogéneo. Bajo ciertas condiciones, las bacterias se agrupan formando flósculos o gránulos de alta densidad con excelentes características de sedimentación, o sea, que permanecen en el fondo del reactor por sí mismos, pero a pesar de esto, el flujo combinado ascendente del afluente provoca que algunos sólidos suban hasta la parte superior del reactor.

En el lecho de lodos, los contaminantes orgánicos son convertidos en biogás mediante la degradación anaeróbica de los mismos. Las burbujas de biogás ascienden y provocan turbulencia que proveen un mezclado natural en el interior del biodigestor y garantizan un buen contacto entre el efluente y la biomasa, ayudando a la creación de más gránulos, al crecimiento y desarrollo de la población de bacterias y por consiguiente a una mejor eficiencia de remoción de DQO y DBO del efluente.

Parte de las burbujas de biogás que se generan en la zona del manto de lodo se adhieren a los gránulos y ascienden juntos hasta el separador trifásico donde el biogás adherido a los gránulos, al tener una menor densidad, se libera y asciende. Estos gránulos por su alta densidad y sedimentación descienden hasta el manto de lodos y el biogás sube y se captura en el colector de biogás instalado en la parte superior del reactor.

Mediante un sistema de tuberías de escape el biogás se transporta hasta los purificadores donde

disminuyen sus impurezas. Luego el biogás purificado se almacena en un gasómetro o es introducido directamente en un motor de combustión interna para la generación de energía. “A lo largo de la bóveda de cada separador trifásico, y en ambos lados, se instalan las canaletas de recolección del efluente, el cual fluirá a través de vertederos con forma de V, y saldrá del reactor a través de tuberías” [7].

El lodo o afluente que se genera en el reactor se descarga por un sistema de tuberías que se colocan a diferentes alturas para el muestreo y análisis de los diferentes tipos de lodo en las zonas del biodigestor. De esta forma se obtienen los tres productos característicos de un reactor UASB, el biogás, el fertilizante líquido y el lodo rico en proteínas.

1.4.2. Componentes Principales

Los reactores UASB presentan un conjunto de componentes que no se encuentran en otros reactores como los separadores trifásicos que son su principal característica.

Separador Trifásico

Los separadores trifásicos o Separadores Gas-Líquido-Sólido (Figura No. 1.15), es uno de los dispositivos más importantes de los reactores UASB.



Figura 1.15. Ejemplo de un Separador trifásico. Fuente: [7].

Se componen de un colector de biogás o campana, y de dos deflectores de gas en debajo de las aberturas. Las funciones que tiene el separador trifásico son:

- Atrapar el biogás que se produce en la fase líquida.
- Retener los sólidos suspendidos que flotan en la parte superior del reactor, impidiendo que salgan junto con el líquido efluente.
- Mantienen baja la concentración de sólidos suspendidos del efluente.

Deflectores

Cumplen la función de guiar las burbujas de biogás hacia el sistema colector, además, separan el biogás adherido a los gránulos de lodo.

La distancia entre los deflectores y el fondo del colector de gas, debe de ser por lo menos igual a la distancia entre la pared del reactor y el fondo del colector de gas [7].

Sistema de Distribución del Influyente

El sistema de distribución del influente constituye una parte crucial del reactor, pues, el agua residual influente se debe distribuir en el fondo del reactor tan uniformemente como sea posible para que se mantengan en constante y óptimo contacto con el lodo, para así evitar esquinas muertas en el reactor. Se debe realizar a 0,20 m del fondo del reactor [7].



Figura 1.16. Sistema de distribución del influente. <https://www.biodigestoresasajet.com.mx/biodigestor-uasb-asajet>.

Caja de Distribución

Las cajas de distribución se colocan en la parte superior del biodigestor (Figura No. 1.17). Estas tienen la función de lograr que la distribución del influente sea homogénea.

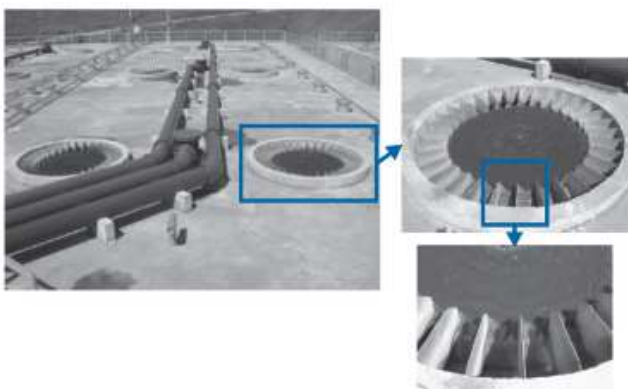


Figura 1.17. Ejemplo de caja de distribución circular y los puntos de inyección. Fuente: [7].

Estas cajas deben asegurar que cada punto de entrada reciba un caudal similar de influente. Generalmente se instalan en los espacios existentes entre los separadores trifásicos. Los puntos de

entrada deben de ser accesibles desde el exterior para facilitar el mantenimiento y destaparlos en caso de obstrucciones. Cuanto mayor sea la cantidad de puntos de inyección, mejor será la distribución del influente y mayor será la eficiencia del reactor [7].

Sistema de descarga del Efluentes

Consiste en canales por donde fluye el efluente que se instalan a los lados de los separadores trifásicos. El efluente sale del reactor a través de tubos o canales.

Descarga del Lodo

El lodo que se produce en el reactor UASB debe ser descartado de manera periódica una vez que el nivel del manto de lodo alcanzó el nivel óptimo. Los tubos de descarga también permiten la toma de muestras para evaluar la actividad del lodo a distintas alturas.

El primer tubo (empezando desde abajo) se debe colocar alrededor de 0.20 m sobre el sistema de inyección de influente y el último a unos 0.05 m por debajo de los deflectores de gases. El resto de los tubos (al menos uno más), se deberán distribuir uniformemente entre estos dos puntos [7].

En el extremo de los tubos de descarga dentro del reactor, es conveniente instalar un resguardo en forma de T para facilitar el muestreo del lodo y evitar obstrucciones. Los tubos de descarga deben ser equipados con válvulas y el lodo se debe descargar lentamente por gravedad para prevenir la formación de vórtices. Las instalaciones de descarga de lodo deben también permitir el muestreo del contenido del reactor. Para una purga completa del reactor, también puede ser de utilidad la instalación de tubería de descarga en el mismo fondo [7].

Es necesario incorporar provisiones en el diseño para remover el exceso del lodo en el reactor. Generalmente un buen lugar para descargar el exceso de lodo es a un medio la altura del reactor (Lettinga y Hulshoffpol, 1991).

1.4.3.Ventajas y desventajas de los Reactores UASB

Ventajas

- Elevada Capacidad de tratamiento,
- Bajo tiempo de retención hidráulico,
- Bajo requerimiento energético,
- Construcción y mantenimiento fáciles,
- Son sistemas compactos, con baja demanda de área,
- Se obtienen niveles de remoción de DBO/DQO superiores al 80 %,

- Bajo costo de operación,
- El consumo de potencia es bajo, debido a que no requiere agitación mecánica,
- Se obtiene una elevada concentración de lodo excedente, por lo que no necesitan de una unidad de espesamiento de lodos.

Además de las ventajas anteriormente mencionadas, a través del proceso de UASB, se obtienen subproductos que pueden ser utilizados posteriormente:

- Biogás: producto principal, puede ser implementado para la cogeneración.
- Lodo: su composición presenta una alta riqueza en cuanto al contenido de materia orgánica como mineral, pudiendo emplearse como biofertilizante y mejorador de suelos y como alimento animal como peces.
- Efluente líquido: Según investigaciones realizadas, conserva nitrógeno en forma fácilmente asimilable lo que lo enriquecen y lo hacen ideal para el fertirriego.

Desventajas

- La principal desventaja de estos reactores es que el efluente líquido no debe contener altos valores de sólidos debido a que se pueden obstruir las tuberías de alimentación, principalmente los inyectores.
- Producción de gases como el ácido sulfhídrico el cual es muy corrosivo, tóxico y amoniaco.
- La cantidad de sulfatos que debe de contener el efluente líquido tiene que ser baja para evitar la inhibición del proceso y para que la producción de ácido sulfhídrico sea menor.
- Difícil control de los procesos de floculación y granulación.
- Difícil puesta en marcha, y además es sensible a sobrecargas y al cambio climático,

La puesta en marcha o el arranque del reactor es el proceso más tedioso que dura entre 2 semanas a 6 meses en dependencia de las aguas residuales utilizadas, la temperatura, el pH, la baja tasa de crecimiento, etc.

1.5. Principales características del Biogás

Es la mezcla de gases resultantes de la degradación de la biomasa realizada por acción bacteriana en condiciones anaerobias (sin oxígeno). El biogás está compuesto por un (50-70) % de gas Metano (CH₄), (30-50) % de Dióxido de Carbono (CO₂) y pequeñas cantidades de otros gases como vapor de agua, oxígeno, hidrogeno, nitrógeno y ácido sulfhídrico. En la tabla 1 confeccionada por [8], se realiza una comparación entre las propiedades principales del biogás con otras fuentes de energía.

Tabla 1.2. Energía Equivalente del biogás Vs otras fuentes. Fuente: [8].

Valores	Biogás	Gas Natural	Gas Propano	Gas Metano	Hidrógeno
Valor Calorífico (kWh/m ³)	7	10	26	10	3
Densidad (t/m ³)	1,08	0,7	2,01	0,72	0,09
Densidad con respecto al aire	0,81	0,54	1,51	0,55	0,07
Límite de explosión (% de gas en el aire)	(6-12)	(5-15)	(2-10)	(5-15)	(4-80)
Temperatura de encendido (K)	687	650	470	650	585
Máxima velocidad de encendido en el aire (m/s)	0,31	0,39	0,42	0,47	0,43
Requerimiento teórico de aire (m ³ /m ³)	6,6	9,5	23,9	9,5	2,4

El metano es un gas incoloro e inodoro, cuya combustión produce una llama azul y productos no contaminantes. El metano es el único elemento presente en el biogás que se puede convertir en energía ya sea eléctrica o mecánica, y su porcentaje determina la capacidad calorífica del biogás, alrededor de (20-25) MJ/m³, comparado con el gas natural, (33-38) MJ/m³, el biogás tiene un poder calórico menor.

El CO₂ es el segundo compuesto presente en el biogás que se encuentra en grandes cantidades, mientras mayor sea el porcentaje de CO₂ menor será el metano del biogás y por consiguiente menor será el poder calórico del mismo. El ácido sulfhídrico se encuentra en menores proporciones, pero es un compuesto tóxico, altamente corrosivo y formador de lluvias ácidas.

1.5.1. Aplicaciones del Biogás

Debido a que el poder calórico del biogás es de 7 kWh/m³, los usos que se le dan a este son variados, entre estos se encuentran la producción de calor o vapor de baja presión, combustible de vehículos y la cogeneración.

La producción de calor a partir del biogás es uno de los usos más frecuentados por las zonas rurales en las que existe escases de combustible, que lo utilizan para cocinar, calentar agua, etc. Para esto se emplean estufas que tienen una alta eficiencia en el uso de este combustible, son de bajo costo y de fácil mantenimiento.

El biogás puede ser utilizado también en motores de combustión interna ya sea de diésel o de gasolina, pero para esto debe de ser purificado primeramente para que tenga una calidad similar a la del gas natural [8].

El biogás puede ser implementado para la cogeneración. La cogeneración es la generación simultánea de dos tipos de energía, ya sea energía eléctrica y energía térmica. Esto está en dependencia del sistema

de cogeneración que se utilice, existen plantas de cogeneración que utilizan motores alternativos cuyo combustible es el biogás para generar energía eléctrica y el calor residual se puede usar para calentar agua.

También hay plantas que generan calor con el biogás, para producir vapor a baja presión para mover una turbina de vapor y producir electricidad. En todos estos casos, es necesario siempre una remoción de impurezas como el CO₂, el H₂S, el vapor de agua, entre otros, porque son causantes de corrosión y destrucción de los equipos que utilizan el biogás.

1.5.2. Factores que afectan al proceso de producción de biogás.

La formación de este lodo granulado es fundamental para obtener una buena eficiencia y funcionamiento en el reactor UASB, lo que depende fundamentalmente de la disponibilidad de los nutrientes, temperatura, tipo de agua residual, pH, sedimentación por gravedad [9]. Ver (Anexo 1)

- a) **Temperatura**
- b) **Potencial de Hidrógeno (pH)**
- c) **Biodegradabilidad anaeróbica de la Materia Orgánica (DQO/DBO)**
- d) **Sólidos Totales y Volátiles**
- e) **Nutrientes**

La necesidad de nutrientes en los procesos aeróbicos es mayor que en los procesos anaeróbicos, pero siguen siendo indispensables para que se desarrollen las células y crezca la biomasa. En la tabla 2 se presentan los principales nutrientes y cationes necesarios en los procesos biológicos anaeróbicos.

Tabla 1.3. Requerimientos de nutrientes en procesos biológicos anaeróbicos. Fuente: [7].

Tipo de Nutriente		mg/g DBO	Exceso mg/L	Adición
Macronutrientes	N	5 a 15	50	NH ₃ , NH ₄ Cl, NH ₄ CO ₃
	P	0,8-2,5	10	NaH ₂ PO ₄
	S	1 a 3	5	MgSO ₄ - 7 H ₂ O
Micronutrientes	Fe	0,03	10	FeCl ₂ - 4 H ₂ O
	Co	0,003	0,02	CoCl ₂ - 2 H ₂ O
	Ni	0,004	0,02	NiCl ₂ - 6 H ₂ O
	Zn	0,02	0,02	ZnCl ₂
	Cu	0,004	0,02	CuCl ₂ - 4 H ₂ O
	Mn	0,004	0,02	MnCl ₂ - 4 H ₂ O
	Mo	0,004	0,05	NaMoO ₄ - 2 H ₂ O
	Se	0,004	0,08	Na ₂ SeO ₃
	T	0,004	0,02	NaWO ₄ - 2 H ₂ O
	B	0,004		H ₃ BO ₃

Cationes	Na		100-200	NaCl, NaHCO ₃
	K		200-400	KCl
	Ca		100-200	CaCl ₂ - 2 H ₂ O
	Mg		75-250	MgCl ₂

f) Relación C/N

g) Compuestos Tóxicos

En la Figura 1.12 se aprecia un gráfico donde se representa esta influencia, que depende de la concentración en que se encuentren los compuestos tóxicos.

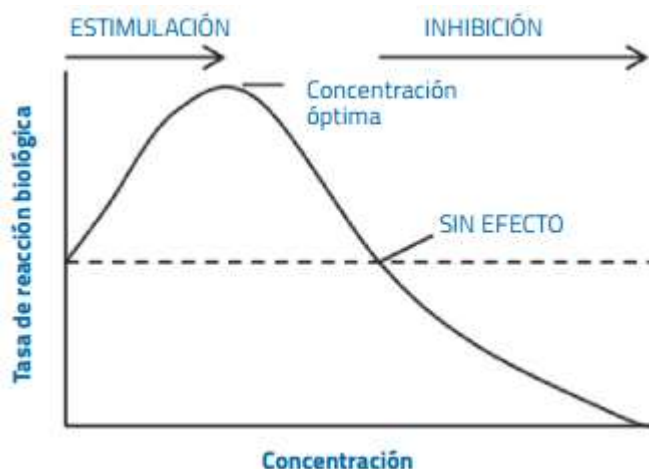


Figura 1.12. Efecto de la concentración de los compuestos tóxicos. Fuente: [7].

h) Ácidos Grasos Volátiles (AGV)

En un reactor estable, la concentración de AGV es inferior a 500 mg/L. Sin embargo, con un adecuado control del pH no se alcanza la inhibición hasta 5 000 mg/L, pero estas concentraciones tan altas no son recomendables [7].

Conclusiones Parciales del capítulo I

1. La industria azucarera cubana genera anualmente altos volúmenes de Vinaza y Cachaza: una zafra de 4 millones de toneladas de azúcar produce cerca de 5 millones de metros cúbicos de Vinaza y 1,6 millones de toneladas de Cachaza. Estos residuos poseen una carga contaminante elevada que afecta el ecosistema y la salud de la población circundante.
2. En la actualidad la mayor parte de las destilerías consumen combustible fósil en la producción de alcohol etílico, tanto para la generación de vapor como para el accionamiento eléctrico.
3. En la literatura especializada aparecen reportes de tecnologías para el aprovechamiento energético de la Vinaza y la Cachaza de forma independiente. En Cuba se han evaluado a nivel de laboratorio

mezclas de varios componentes a diferentes proporciones.

4. Las mayores potencialidades para la producción de Biogás con fines energéticos se obtienen con mezcla a base de bagazo, vinaza y cachaza. Como quiera que el bagazo sustenta la generación de vapor en la industria y los excedentes no alcanzan valores significativos se evalúan los residuales vinaza y cachaza en tres plantas existentes en el país y la mezclas vinaza-cachaza motivo de estudio en esta investigación.
5. Los Reactores Anaeróbicos de Flujo Ascendente (UASB por sus siglas en Inglés) son los más utilizados a nivel industrial para el tratamiento de residuales líquidos. Partiendo de la experiencia obtenida durante su aplicación en las dos plantas del país se considera este tipo de instalación idónea para su empleo con la mezcla vinaza-cachaza.

CAPÍTULO II. ESTRUCTURA DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA.

En este capítulo, se realiza un diagnóstico de la destilería “8 de marzo”, que permite evaluar los volúmenes de producción de la misma, tomando en consideración criterios técnicos y económicos (identificación de las variables que participan en el proceso de toma de decisiones). Este análisis concluye con la elaboración de una propuesta tecnológica para la creación y diseño de una planta de biogás. Luego de una profunda revisión bibliográfica y debido a la extensión del cuerpo de este trabajo el autor considera emplear el manejo de la metodología utilizada por la autora [10] en su tesis de grado para la elaboración de la siguiente propuesta tecnológica debido a las similitudes existentes en el diseño entre plantas de biogás.

2.1 Breve caracterización y diagnóstico de la destilería “8 de marzo”

La destilería objeto de estudio se encuentra en la provincia Holguín y pertenece a la Empresa Azucarera ubicada específicamente en el municipio de urbano Noris. La instalación se encuentra alojada en una zona donde hay vegetaciones agrícolas, esto se debe a que toda industria debe ser construida en ese tipo de lugares para que los árboles y los sembradíos disminuyan los niveles contaminantes que estas producen.

2.1.1 Ubicación geográfica.

El CAI Urbano Noris y la Destilería 8 de marzo están ubicados en el municipio del mismo nombre de la provincia de Holguín, Cuba (Figura 2.1). Tiene una extensión de 845 km² y su densidad poblacional es aproximadamente de 51,7 habitantes por km², teniendo 43 686 habitantes aproximadamente.



Figura 2.1 Ubicación del municipio de Urbano Noris y la Destilería 8 de marzo.

En esta región predomina un clima tropical con temperaturas entre 27-35 °C. En este municipio se encuentra además del central azucarero la destilería que produce como principal producto alcohol y vinazas residual producto de la destilación alcohólica.

2.1.2 Diagnóstico de Proceso de la destilería “8 de marzo”.

Producto del poco conocimiento y uso en nuestro país de las tecnologías existentes para el aprovechamiento de los residuos emitidos por las industrias agrícolas y en este caso de la industria azucarera la disposición y uso de los residuos de la destilería “8 de marzo” y la empresa azucarera “Urbano Noris ha causado los siguientes problemas: Insuficiente control de los residuales de la producción alcohol y azúcar en el vertido hacia las cuencas hidrográficas. Daño medioambiental por la forma de disposición de los residuales de la producción de alcohol. No se aprovecha la cachaza y la vinaza, residuos orgánicos de alto contenido energético. Características altamente contaminantes de los residuos cachaza y vinaza.

Descripción del proceso productivo de la destilería “8 de marzo”

La miel final o miel B proveniente de la industria azucarera es alimentada a un disolutor con agua a contracorriente con el objetivo de obtener una mezcla de 16° Brix homogénea, que al agregarle 20 m³ de un concentrado de levadura desarrollada en un pre fermentador se produce una mezcla compuesta de varias sustancias, esencialmente: etanol y agua. [11].

La fase líquida, también conocida como vino, es la que se alimenta a la torre destiladora, a ésta se le inyecta vapor saturado por el fondo como medio de calentamiento. Esta columna es la encargada de agotar todo el alcohol presente en el vino, obteniéndose por el tope vapores con un 40 % de etanol que luego pasan a la etapa de rectificación, donde se obtendrá el producto deseado: alcohol rectificado. Y por el fondo se genera la vinaza, un líquido de color oscuro altamente contaminante y corrosivo. (Rodríguez, 2017). (Figura 2.2)

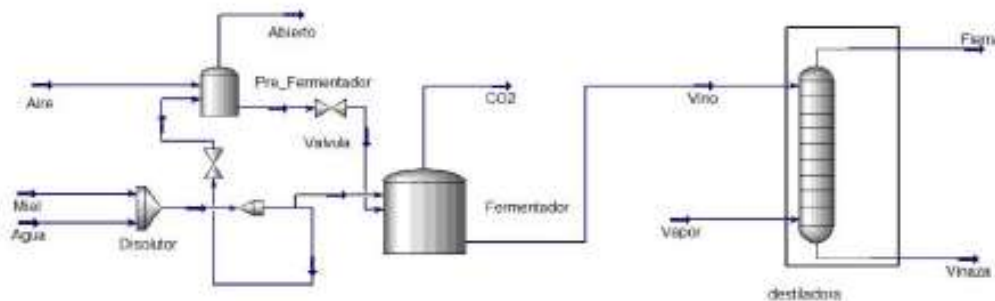


Figura 2.2.

Diagrama de flujo del proceso productivo de la destilería “8 de marzo”.

Volúmenes de vinazas emitidos diariamente por la destilería “8 de marzo”.

En la Destilería se vierte gran volumen de vinaza, que se considera en el orden de los 900 m³/día con un índice de 1.6 m³/hl de alcohol producido. Este volumen de vinaza en un año asciende a 270 000 m³/día,

es decir hasta el momento se estaban subutilizando 270 000 m³/día de residuos de alto contenido energético.

Volumen de combustible que se necesita para el funcionamiento de la destilería.

Anualmente esta empresa necesita para su funcionamiento alrededor de 2 523 290 L/año. Teniendo en cuenta la tabla anterior equivalencia anual de producción de biogás, se puede afirmar que el biogás producido puede cumplir satisfactoriamente con las exigencias de combustible que posee la destilería, ya que con el biogás producido anualmente por la planta se podría generar una equivalencia a fuel oil de 5 586 174 L/año superando en 3 062 884 L/año la cifra de combustible que necesita la destilería para su funcionamiento, generando así grandes ganancias para la economía del país.

¿Cuánta electricidad consume mensual y anual esta empresa?

En datos obtenidos en la revisión de la documentación técnica en visitas a esta empresa se pudo comprobar que se establecieron que para su funcionamiento debe consumir anualmente del (SEN) alrededor de 818 916 kW/año. De igual forma comparando esta cifra con la tabla anterior equivalencia anual de producción de biogás se puede afirmar que la electricidad obtenida luego de la implementación de la planta será suficiente para abastecer la destilería e incluso suministrarle energía eléctrica al (SEN), ya que el biogás producido tiene una equivalencia en energía eléctrica de 14 388 630kW.

También a partir de la miel B se obtiene el alcohol y la vinaza altamente contaminante. La destilería genera entre 800-900 m³/d, que sale con una temperatura de alrededor de 106 °C y se envía por tuberías a las lagunas de estabilización hasta utilizarlas en el fertirriego.

Tabla 2.1. Cantidad de vinaza producida diaria en el periodo 2015-2019.

Parámetro	2015	2016	2017	2018	2019
Alcohol producido en el año (hectolitros)	89 070,46	50 614,3	94 415,94	74 741,94	108 381,51
Días efectivos	250	328	285	309	284
Vinaza (m ³ /d)	570	247	530	387	610,6

2.2 Propuesta tecnológica para el diseño de una planta de Biogás.

Los procesos de globalización a nivel mundial han influido en la eficiencia y competitividad de la producción empresarial, así como en todos los procesos sociales en general. Hoy la brecha tecnológica que separa a los países ricos de los pobres crece en forma exponencial, lo que obliga a estos últimos a adoptar políticas nacionales en ciencia y tecnología muy cautelosas. En el caso de Cuba, existen las condiciones necesarias para trazar su política nacional de ciencia e innovación tecnológica; sin embargo,

existe un escaso conocimiento en la utilización de tecnologías que guíen el proceso de diseño de una estrategia de innovación [12].

Para realizar la propuesta tecnológica se tuvo en cuenta el diagnóstico a la destilería “8 de marzo”, con el objetivo de conocer los procesos y flujos productivos, de esta entidad, los volúmenes de vinaza-cachaza que se producen diariamente, la cantidad de combustible que se requiere para su funcionamiento y electricidad consumo, necesarios estos elementos para realizar una propuesta tecnológica para el diseño de una planta de biogás que me permita cambiar la matriz energética de la misma.

La propuesta tecnológica constará de tres fases donde se realizan todas las acciones necesarias: Fase 1. Identificación de la tecnología para el diseño; Fase 2. Elaboración de la documentación del diseño; y la Fase 3. Evaluación y Viabilidad del diseño. La misma estará estructurada de la siguiente forma.

Para llevar a cabo este proceso es necesario seguir el desarrollo ordenado de las siguientes fases: necesidad, idea, desarrollo de idea, construcción y verificación de la solución.

Fase 1. Identificación de la tecnología para el diseño

1. Estudio básico (o conceptual) para la selección de la planta de biogás.
2. Clasificación y selección de los residuales que se utilizarán para el funcionamiento de la planta de biogás.
3. Definición de la tipología de la Planta.

Fase 2. Elaboración de la documentación del diseño.

1. Cálculos para los requerimientos de instalación.
2. Selección del tanque de recepción (vinaza)TRV-01.
3. Selección del tanque de homogenización (vinaza, cal) TTRAT-01.
4. Selección del tanque de recepción(cachaza)TRCH-01.
5. Selección del sistema de enfriamiento del sustrato.
6. Selección del digestor y postdigestor.
7. Selección del sistema de purificación del biogás.
8. Selección del tanque de almacenamiento del digestato.
9. Selección del lecho de lodos.
10. Selección del tanque de almacenamiento del biogás(gasómetro).
11. Selección de los sistemas de conducción de la planta.

Fase 3. Evaluación y Viabilidad del diseño.

1. Evaluación económica y de rentabilidad.

2.3 Fase 1. Identificación de la tecnología para el diseño.

2.3.1 Estudio básico (o conceptual) para la selección de la planta de biogás.

En este primer paso se realizó la correspondiente revisión bibliográfica actualizada, referente al tema de las tecnologías existentes para el diseño de plantas de biogás agroindustriales. Además, se realizaron visitas a la empresa azucarera con el objetivo de familiarizar con el proceso productivo de la entidad. ¿Qué productos comercializa la misma?, ¿Qué residuos generan?, ¿En qué cantidades los generan?, ¿Cómo influyen en el sitio la emisión de estos residuos? En este paso también se planteó en reunión con la junta directiva de la empresa, la creación de un grupo de expertos formada por el personal de mayor experiencia y directivos, (Para la toma de decisiones)

2.3.2 Clasificación y selección de los residuales que se utilizarán para el funcionamiento de la planta de biogás.

En este paso, el grupo de experto realizó un diagnóstico para determinar y caracterizar los principales problemas del uso y disposición de los residuos existentes de la entidad también se determinó la clasificación de los residuos producidos por la empresa, los niveles de residuos generados diariamente por la misma, se analizó la existencia de los programas de manejo de residuos y se analizaron además la proyección de los objetivos estratégicos, acciones y metas hasta el 2030.

2.3.3 Definición de la tipología de la Planta.

En consecuencia, de los pasos anteriores y teniendo en cuenta todos los datos procurados por el diagnóstico de los residuos producidos por la entidad, se dispone a proponer la tipología de planta de biogás más adecuada según los requerimientos obtenidos. En este caso el tipo de planta que se propuso fue una planta de biogás agroindustrial que trabaje con los residuos vinaza-cachaza, (residuos de alto contenido energético) producidos por la destilería “8 de marzo” y la empresa azucarera “Urbano Noris”.

Para el diseño de la planta se decidió implementar tres reactores tipo UASB por el flujo de residuos producido por día y por las bondades que este ofrece a la hora de producir el biogás. La planta contará además con un tanque de recepción donde se verterá la vinaza procedente de la destilería. Como la vinaza sale a muy altas temperatura se instalará además intercambiadores de calor para llevar la vinaza a 37°C antes de que entre a los biodigestores, se deben construir además 2 reactores de postratamiento, una planta purificadora de H₂S, un tanque de almacenamiento para el digestato y un gasómetro para el almacenamiento del biogás producido.

2.4 Fase 2. Elaboración de la documentación del diseño.

2.4.1 Cálculos para determinar los requerimientos de instalación.

Cantidad de metano producido por m³ de sustrato.

$$V_{CH_4} = Q_{vinaza} \cdot DQO(1 - y) \left(\frac{E_{fDQO}}{100} \right) \cdot 0,35 \left(\frac{T^{\circ}C + 273}{273} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_{metano} = Q_{biogás} \cdot C_{metano} \dots\dots\dots (2)$$

Cálculo del volumen de biogás producido por día.

$$Q_{metano} = Q_{biogás} \cdot C_{metano} \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{metano}}{C_{metano}}$$

Cálculo del volumen de sulfuro en m³ de biogás

$$V_{H_2S} = Q_{biogás} \cdot 0,01 \dots\dots\dots (4)$$

$$V_{H_2S} = 28\,213 \text{ m}^3/\text{día} \cdot 0,01$$

$$V_{H_2S} = 282,13 \text{ m}^3/\text{día}$$

Cálculo del volumen de biogás desulfurado (m³ /día).

$$V_{biogás \text{ desulfurado}} = Q_{biogás} - V_{H_2S} \dots\dots\dots (5)$$

Cálculo de la energía primaria obtenida.

$$E_{primaria} = Q_{metano} \cdot PCI_{metano} \dots\dots\dots (6)$$

Cálculo de la potencia primaria (kWh/día).

$$P_{primaria} = E_{primaria}/24 \dots\dots\dots (7)$$

Posteriormente se procede a calcular la cantidad de sustrato necesario para el funcionamiento de la planta. García L. E (2017) plantea que para obtener la cantidad de sustrato necesaria primeramente se debe elegir una maquina térmica que transforme la energía química obtenida en energía mecánica.

Además, alega que comúnmente las maquinas térmicas empleadas en este ámbito son motores alternativos de combustión interna con encendido por chispa (ciclo Otto) pero a su vez es posible modificar un motor gasoil con encendido por compresión (ciclo Diesel) con el requisito de que en funcionamiento continuo el combustible debe ser un 20% de gasoil o biodiesel para provocar la ignición de la mezcla.

También se pueden implementar las microturbinas que tiene un rendimiento mecánico inferior y coste económico mayor, pero en cambio producen menos vibraciones y más calor útil para otros procesos.

Por lo que se decide comenzar calculando:

Cálculo del flujo másico del efluente (kg/día).

$$W_{efluente} = F_{efluente} * \rho_{efluente} \dots\dots\dots (8)$$

Cálculo del flujo del medio (*kg/día*).

$$W_{medio} = (W_{efluente} * DQO_{efluente})/DQO_{medio} \dots\dots\dots (9)$$

Balance de masa el flujo másico de agua (*kg/día*).

$$W_{H_2O} = (W_{medio} - W_{efluente}) \dots\dots\dots (10)$$

Cálculo del flujo volumétrico del agua (*m³/día*).

$$F_{H_2O} = (W_{H_2O} / \rho_{H_2O}) \dots\dots\dots (11)$$

Cálculo del flujo total que entra al reactor (vinaza y agua) (*m³/día*).

$$F_{Total} = (F_{H_2O} + F_{efluente}) \dots\dots\dots (12)$$

Es importante mencionar que, en algunos casos, la generación de biogás puede ser estacional, por lo que el dimensionamiento del equipo debe ser estimado para maximizar los parámetros económicos de la instalación. Finalmente, para estimar la potencia eléctrica y térmica, se debe considerar la eficiencia de los equipos. A modo de ejemplo, un equipo de cogeneración posee eficiencias cercanas a las que se muestran a continuación:

Tabla 2.2 eficiencias

Energía	Eficiencia
Eléctrica	30%
Térmica	50%

Cálculo de la potencia eléctrica (*kWh/día*).

$$P_{eléctrica} = P_{primaria} * \eta_{eléctrica} \dots\dots\dots (13)$$

Cálculo de la potencia térmica (*kWh/día*).

$$P_{térmica} = P_{primaria} * \eta_{térmica} \dots\dots\dots (14)$$

Posteriormente, para determinar la energía requerida (*kWh/día*), para calentar el biodigestor se deben considerar las pérdidas térmicas del digestor, el caudal y la temperatura de entrada del sustrato. En este caso consideraremos un proceso adiabático, por lo que no se incluyen las pérdidas térmicas.

$$E_{requerida} = Q_{sustrato} * CP_{sustrato} * \Delta t \dots\dots\dots (15)$$

Debido a que el sustrato se encuentra en fase líquida, una buena aproximación corresponde a la utilización del calor específico y densidad del agua, con el cual se obtiene el volumen de biogás requerido:

Poder calorífico del biogás (*kWh/ m³*).

$$PCI_{biogás} = PCI_{metano} * C_{metano} \dots\dots\dots (16)$$

Volumen de biogás requerido ($m^3/día$).

$$V_{biogás} = \frac{E_{requerida}}{PCI_{biogás}} \dots\dots\dots (17)$$

Luego se decide determinar las pérdidas de carga

La pérdida de carga en una tubería o canal corresponde a la pérdida de presión que se produce en un fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las conduce. Las pérdidas pueden ser continuas, a lo largo de conductos regulares, accidentales o localizadas, debido a circunstancias particulares, como un estrechamiento, un cambio de dirección, la presencia de una válvula, etc. Para calcularla se debe utilizar la siguiente expresión:

Cálculo de las pérdidas de carga en líneas de biogás y líquidos.

Pérdidas en líneas (1,2,) (Pa)

$$\Delta P = \frac{\mu \cdot l \cdot v^2 \cdot \rho}{2 \cdot D} \dots\dots\dots (18)$$

Pérdidas en línea (3)

$$\Delta P = \frac{\mu \cdot l \cdot v^2 \cdot \rho}{2 \cdot D} \dots\dots\dots (19)$$

Pérdidas en línea (4)

$$\Delta P = \frac{\mu \cdot l \cdot v^2 \cdot \rho}{2 \cdot D} \dots\dots\dots (20)$$

Se debe considerar la densidad absoluta del biogás, oscila entre 0,93 y 1,3 [$kg/m^3 N$] y el coeficiente de fricción depende de la materialidad de la tubería.

Caudal promedio mensual ($m^3/día$).

$$QN_{biogás} = (T_N/T_{efect}) \cdot (P_{efect}/P_N) \cdot Q_{efect} \dots\dots\dots (21)$$

Potencia nominal recomendada ($kWh/día$)

$$P_{nominal} = QN_{biogás} \cdot \%CH_4 \cdot PCI_{metano} \dots\dots\dots (22)$$

Distribución de los equipos en planta.

Para la distribución de la planta y la selección de los equipos se decidió aplicar las recomendaciones técnicas empleadas por la autora García L. F. (2016) Debido a que el autor de este trabajo estima que la metodología empleada por ella es en efecto la más acertada a la hora de trabajar con digestores anaerobios mediante la utilización de sustratos líquidos. Se establece las distancias mínimas recomendables entre los equipos.

- Las distancias entre el almacenamiento de biogás y la sala de instalación de los motores de combustión deben ser de al menos 6 m en la dirección horizontal.

- La distancia mínima recomendada para la instalación del quemador es 30 metros del digestor.

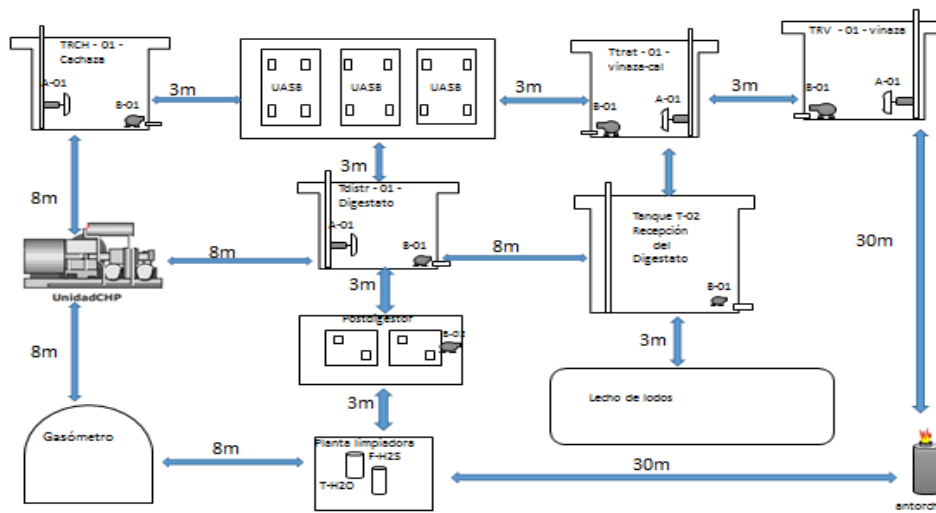


Figura 2.3. Diagrama de distribución de la planta.

2.4.2 Distribución de la planta por áreas.

Área de recepción, descarga y homogeneización de materias primas

La selección del Tanque de recepción (vinaza) TRV-01 y del Tanque de homogeneización (vinaza, cal) TTRAT-01. Antes de introducir los sustratos al digestor se mezclan y homogenizan en el Tanque de recepción (vinaza) TRV-01 y el Tanque de homogeneización (vinaza, cal) TTRAT-01.

Se ha dimensionado estos tanques para un tiempo de residencia de 2 días referido al volumen requerido para alimentar a los 3 biodigestores tipo UASB como el flujo diario hacia el tanque es de (900 m³/día), y con el fin de tener la suficiente capacidad de almacenamiento en caso de un problema con los digestores o cualquier otro elemento de la planta, se decide dimensionar con un volumen de 1 800 m³.

El espesor de las paredes de los tanques se ha previsto que sea de 0,5 m. Cuando se multiplica el V_{efect} por el V_{libre} se obtiene un volumen aproximado de tanque de 1980 m³.

Se ha seleccionado el tanque de forma cilíndrica con el fin de que ocupen una menor superficie, con una altura igual a 6m, se encontrarán situados sobre tierra y se ejecutará su estructura en hormigón armado resistente a filtraciones de agua en ambiente expuesto químicamente.

Las características que se han seleccionado para estos tanques se resumen a continuación:

Tabla 2.3 Descripción del tanque de recepción (vinaza) TRV-01 y del Tanque de homogeneización (vinaza, cal) TTRAT-01.

Tanque de mezcla y homogeneización	
Materiales de construcción	Hormigón armado
Forma	Forma cilíndrica, bajo tierra
Altura	6 m + 0,3 m (f.s)= 6,3 m
Diámetro	20 m
V _{útil}	1 800 m ³ /día
V _{real}	1 980 m ³ /día
Espesor de pared	0,3 m

2.4.3 Cálculos para la selección del Tanque de recepción (vinaza) TRV-01 y del Tanque de homogeneización (vinaza, cal) TTRAT-01.

$$V_E = TRH \cdot X_{Q,3} \dots\dots\dots (23)$$

$$V_E = 2 \text{ días} \cdot 900 \text{ m}^3 / \text{días}$$

$$V_E = 1 800 \text{ m}^3 / \text{días}$$

Volumen Total del Tanque de recepción (vinaza) TRV-01 y del Tanque de homogeneización (vinaza, cal) TTRAT-01.

$$V_T = V_E \cdot (1 + V_l) \dots\dots\dots (24)$$

$$V_T = 1 800 \text{ m}^3 \cdot (1 + 0,10)$$

$$V_T = 1 980 \text{ m}^3$$

Área del Tanque de recepción (vinaza) TRV-01 y del Tanque e homogeneización (vinaza, cal) TTRAT-01.

$$A = V_T / h \dots\dots\dots (25)$$

$$A = 1 980 \text{ m}^3 / 6 \text{ m}$$

$$A = 330 \text{ m}^2$$

Diámetro de la corona del Tanque de recepción (vinaza) TRV-01 y del Tanque de homogeneización (vinaza, cal) TTRAT-01.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \dots\dots\dots (26)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 330 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$D = 20,5 \text{ m}$$

El Tanque de recepción (vinaza) TRV-01 y el Tanque de homogeneización (vinaza, cal) TTRAT-01, dispondrán de una entrada de sustratos en la parte superior por donde entrará la vinaza al tanque, una salida de biomasa en la parte inferior por donde saldrá el sustrato a través de una bomba que lo impulsará

hasta el digester, y una descarga de arenas y/o material inorgánico que pueda haberse formado producto de la agitación del sustrato mediante los dispositivos de remoción, producto además de las cantidades de cal que se le suministra para bajarle el PH.

El tanque estará cubierto para evitar la entrada de aguas fluviales y la emisión de malos olores producto a la presencia del H₂S en la mezcla. El piso del tanque tendrá una pendiente del 0,5% hacia la tubería de descarga de arenas. La tubería de salida hacia el digester está ubicada 10 cm más arriba del fondo del tanque para que arenas acumuladas en el fondo no descarguen en el digester.

Todas las entradas y salidas tendrán instaladas todos los accesorios de seguridad válvulas de bolas, manómetros, vacuómetros, arrestallamas, entre otros además cada una de ellas deben poseer sus propias llaves de paso y sus respectivos medidores de caudal. Es de vital importancia que todas estas válvulas y llaves sean de excelente calidad y no de metales dulces como el cobre o bronce que podrían generar serios problemas de corrosión. Como zonas problemáticas en el interior del tanque, hay que considerar la transición entre el nivel máximo de llenado, se debe prever en esta zona el revestimiento con pinturas epóxicas o bituminosas para que el hormigón no se degrade o corroa.

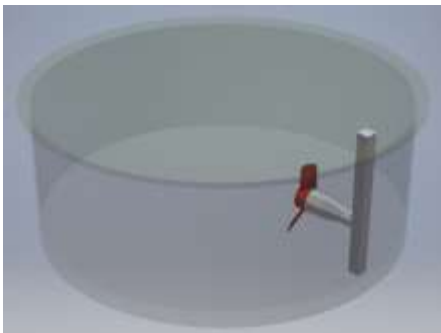


Figura 2.3. Tanque de recepción (vinaza)TRV-01 y Tanque de homogenización (vinaza, cal) TTRAT-01.

2.4.4 Selección de Agitadores del Tanque de recepción y homogenización

Selección para tanque de recepción (vinaza)TRV-01 y el de homogenización (vinaza, cal) TTRAT-01 (A-01, A-02, A-03).

Para realizar la mezcla de los sustratos en el Tanque de recepción (vinaza)TRV-01 y en el Tanque de homogenización (vinaza, cal) se instalará un sistema de agitación, como regla general la potencia del motor del equipo se debe considerar entre 5-8 [W/m²] por superficie superior de reactor.

Cálculo de la potencia de agitación (*kW*).

$$P_{\text{Agitación}} = 8 \left[\frac{W}{m^2} \right] \times \text{Superficie (m}^2\text{)} \dots\dots\dots (27)$$

Por lo tanto, necesitaremos una potencia de agitación de 2,4 kW. El fluido a agitar presenta una viscosidad y densidad similar al agua. Para este tipo de fluidos la autora García L. F. (2016) nos recomienda el uso de agitadores tipo turbina o hélice. Por lo que se seleccionó un agitador sumergido tipo hélice, principalmente diseñados para homogeneizar sustratos líquidos (vinazas, purines, etc.), de la marca BOMBAS IDEAL S.A., sus características se presentan a continuación. Para evitar problemas de corrosión el material de construcción del agitador será de acero inoxidable AISI 316.



Figura 2.4. Agitador sumergible del tanque de homogeneización.

Según sus datos de diseño el agitador consta de una hélice dinámica de alto rendimiento y sistema de autolimpieza de álabes. El agitador dispone de protección térmica con sensores térmicos en el bobinado, protección de estanqueidad, con sonda en la cámara de aceite y sistema de refrigeración por sumergencia. (Anexo 3)

Tablas 2.4. Descripción del agitador sumergible del tanque de alimentación del sustrato.

Modelo AGS 400-3SHG	
RPM	470
Voltaje (V)	400/690
Intensidad (A)	4,8
P ₂ (kW)	3,4
Q (l/s)	400
Diámetro hélice (mm)	400
Eficiencia (N/kW)	300/14

Tablas 2.4.1 Descripción del agitador sumergible del tanque de alimentación del sustrato.

Materiales construcción	
Carcasa	Inox AISI 316 L
Cable eléctrico	Neopreno H07RN/F
Eje	Inox AISI 420
Hélice	Inox AISI 316 L
Tornillería	Inox AISI 316 L

Selección de la Bomba sumergible de alimentación (B-01).

La bomba 1 estará sumergida en el tanque de alimentación, bombeará el sustrato hasta el digestor, Se decidió instalar dos bombas que funcionaran alternativamente, con el fin de incrementar la vida útil de las

mismas. De esta forma se puede mantener la alimentación en caso de avería o tereas de mantenimiento. La bomba deberá impulsar un caudal constante de 100 m³ /h a una altura de unos 8 m; deberá tener al menos una potencia de 5,5 KW.

Para este servicio se ha seleccionado una bomba sumergible ZGTPYBY modelo 150wq100-7-5.5



Fig. 2.5 bomba sumergible ZGTPYBY modelo 150wq100-7-5.5

Las bombas de la gama ZGTPYBY están diseñadas para bombear sustratos líquidos generados en cualquier instalación, y su uso es aplicable en diversas aplicaciones industriales. Es una bomba sumergible de fundición, con motor totalmente sumergible antideflagrante integrado de una fase. El diseño es compacto y permite una instalación provisional y permanente. Otra ventaja muy importante de este tipo de bombas es que posee un aparejo que permite desconectarla del tubo y sacarla para mantenimientos sin que el operador requiera entrar al tanque.

A continuación, se resumen las características técnicas más importantes:

Tabla 2.5 Bomba 1: Alimentación al digestor.

Bomba 1: Alimentación al digestor	
Empresa	ZGTPYBY
Modelo	150wq100-7-5.5
Materiales	Cuerpo: Hierro fundido/acero inoxidable
Presión máxima de trabajo	Alta presión
Temperatura de trabajo	0-50 °C
Caudal máximo	100 m ³ /h
Altura máxima de impulsión	15m
Potencia nominal	5,5 kW

2.4.5 Selección del Tanque de recepción (cachaza) TRCH-01.

El Tanque de recepción(cachaza)TRCH-01 será diseñado de igual forma que los tanques de recepción (vinaza)TRV-01 y el tanque de homogenización (vinaza, cal) TTRAT-01, solo cambiará el TRH de la cachaza y el flujo de entrada al tanque. Todas las entradas y salidas tendrán instaladas todos los accesorios de seguridad válvulas de bolas, manómetros, vacuómetros, arrestallamas, entre otros además

cada una de ellas deben poseer sus propias llaves de paso y sus respectivos medidores de caudal. Es de vital importancia que todas estas válvulas y llaves sean de excelente calidad y no de metales dulces como el cobre o bronce que podrían generar serios problemas de corrosión. Sus dimensiones se calcularán mediante las fórmulas.

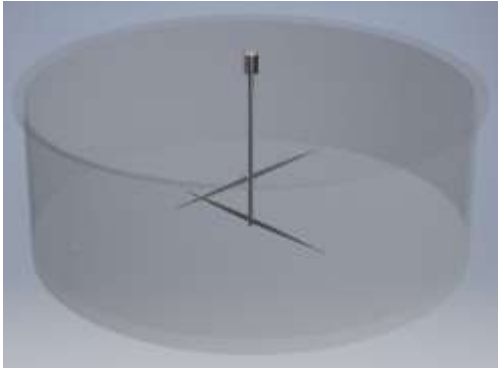


Figura 2.5.1. Agitador sumergible del tanque de recepción(cachaza)TRCH-01
Cálculos para la selección del Tanque de recepción(cachaza)TRCH-01

$$V_E = TRH \cdot X_{Q,3} \dots\dots\dots (28)$$

$$V_E = 6 \text{días} \cdot 900 \text{m}^3 / \text{días}$$

$$V_E = 5\,400 \text{m}^3 / \text{días}$$

Volumen Total del Tanque de recepción(cachaza)TRCH-01

$$V_T = V_E \cdot (1 + V_l) \dots\dots\dots (29)$$

$$V_T = 5\,400 \text{ m}^3 \cdot (1 + 0,10)$$

$$V_T = 5\,940 \text{ m}^3$$

Área del Tanque de recepción(cachaza)TRCH-01

$$A = V_T / h \dots\dots\dots (30)$$

$$A = 5\,940 \text{m}^3 / 6 \text{m}$$

$$A = 990 \text{m}^2$$

Diámetro de la corona del Tanque de recepción(cachaza)TRCH-01

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \dots\dots\dots (31)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 990 \text{m}^2}{\pi}}$$

$$D = 17.75 \text{m}$$

Tabla 2.5.1 Tanque de recepción de cachaza.

Tanque de recepción de cachaza	
Materiales de construcción	Hormigón armado
Forma	Forma cilíndrica, sobre tierra
Altura	6 m + 0,3 m (f.s)= 6,3 m
Diámetro	17,5 m
V _{útil}	5 400 m ³ /día
V _{real}	5 940 m ³ /día
Espesor de pared	0,3 m

Cálculo de la potencia de agitación.

$$P_{\text{Agitación}} = 8 \left[\frac{W}{m^2} \right] \times \text{Superficie (m}^2\text{)} = 7,9(\text{kW}) \dots\dots\dots (32)$$

Por lo tanto, se decide instalar un agitador de tres niveles modelo AGS 600 35HX/13.

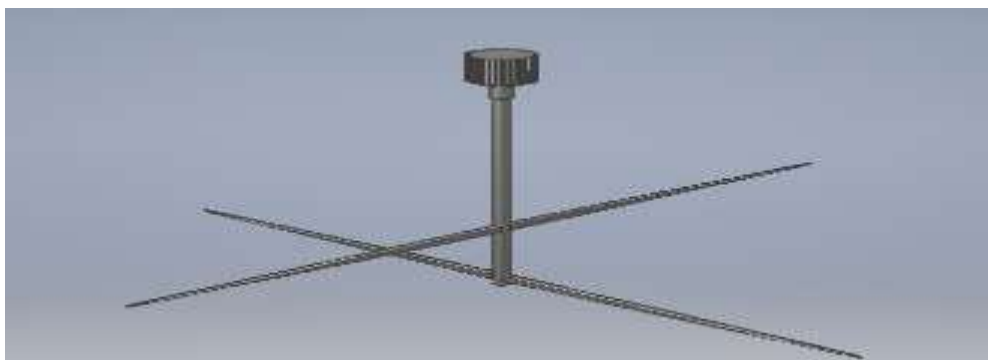


Figura 2.5.2. Agitador sumergible del tanque de recepción de cachaza.

Tablas 2.5.2 Descripción del agitador sumergible del tanque de recepción de cachaza.

Modelo AGS 600 35HX/13	
RPM	670
Voltaje (V)	400/690
Intensidad (A)	4,8
P ₂ (kW)	8,2
Q (l/s)	400
Diámetro hélice (mm)	400
Eficiencia (N/kW)	300/14

Tablas 2.5.3 Descripción del agitador sumergible del tanque de recepción de cachaza.

Materiales construcción	
Carcasa	Inox AISI 316 L
Cable eléctrico	Neopreno H07RN/F
Eje	Inox AISI 420
Hélice	Inox AISI 316 L
Tornillería	Inox AISI 316 L

Selección de la Bomba sumergible de alimentación (B-01).

Para el tanque de recepción de cachaza se escogerá el mismo tipo de bomba que se escogió para los tanques de homogenización y recepción de vinazas.



Fig. 2.5.3 bomba sumergible ZGTPYBY modelo 150wq100-7-5.5

Tabla 2.5.4 Bomba 1: Alimentación al digestor.

Bomba 1: Alimentación al digestor	
Empresa	ZGTPYBY
Modelo	150wq100-7-5.5
Materiales	Cuerpo: Hierro fundido/acero inoxidable
Presión máxima de trabajo	Alta presión
Temperatura de trabajo	0-50 °C
Caudal máximo	100 m ³ /h
Altura máxima de impulsión	15m
Potencia nominal	5,5 kW

2.4.6 Área de digestión anaerobia y generación de biogás

Selección del Reactor UASB.

El reactor seleccionado es de 3 módulos UASB de dimensiones 15X15X5. los cálculos y requisitos técnicos necesarios para el diseño y selección del mismo se encontrarán en el capítulo III.

2.4.7 Intercambiador de calor externo para calentamiento de sustrato (IC)

En los procesos de digestión anaerobia una de las variables que influyen enormemente en la producción de biogás es la temperatura. En la planta propuesta se ha optado por instalar un sistema de enfriamiento externo, es decir, antes de la entrada al Tanque de recepción T-01 se realizará el enfriamiento del sustrato en un intercambiador de calor situado en el exterior del tanque de recepción, el sustrato deberá enfriarse antes de entrar al tanque de recepción, ya que la vinaza sale de la destilería entre (95-100) °C para lograr enfriar el sustrato se decidió instalar 1 intercambiador de calor el cual trabajará en función de disminuirle la temperatura a la vinaza.

El intercambiador de calor ubicado en la destilería utilizará el vino procedente del proceso de la producción de etanol para reducir la temperatura del sustrato de (100-85) °C, mientras que el intercambiador de calor que se implementará en la planta de biogás, antes de la entrada del tanque de recepción T-01 enfriará la

vinaza con el digestato procedente del postdigestor para lograr la temperatura necesaria para la digestión que debe ser entre (35 a 40) °C (Temperatura mesofílica)

De los diferentes modelos de intercambiadores de calor empleados en plantas de biogás (doble tubo, carcasa tubo, placas o espirales) se ha seleccionado un intercambiador de calor tipo Soldado Placa ya que es una estructura sencilla y fácil de instalar. [13] muestra que el grosor de la placa es pequeño, el coeficiente de transferencia de calor es alto, la eficiencia de transferencia de calor es más del 80% y el líquido estancado es menor. Es de tamaño pequeño, peso ligero, ahorra gastos de transporte.

La cantidad total es equivalente al 20%-30% del intercambiador de calor tipo tubo. Es ideal para soportar altas temperaturas y alta presión. El límite de temperatura de hasta 250°C, y la presión puede alcanzar 45 bar. Ahorra gran cantidad de energía, y presenta bajo consumo de agua: En la misma situación de trabajo, el consumo de agua es solo equivalente al 1/3 del intercambiador de calor tipo concha y tubo. Bajo coeficiente de fouling el efecto de turbulencia es bueno para reducir el coeficiente de suciedad, y los tiempos de limpieza se reducen, y el costo de mantenimiento se ahorra. Sin óxido, resistencia a la corrosión: el uso de placas de acero inoxidable 316L y 304 puede reducir los problemas de corrosión. Aspecto hermoso, alto rendimiento.

Tabla 2.6. Propiedades de los fluidos del intercambiador.

Parámetros	Fluido frío	Fluido caliente
m (kg/s)	0,996	2,23
T _{enta}	45	95
T _{sal}	37	37

Dimensiones del intercambiador:

Las dimensiones y características se escogieron del sitio web catálogo para componentes de plantas de biogás

Tabla 2.7. Descripción de los tubos del intercambiador.

Marca: HDC
Estructura: Soldado Placa de intercambiador de calor
Máxima: Presión de Trabajo: 30-45 bar
Función: Líquido de enfriamiento

Selección del intercambiador (IC).

Conocida el área de transferencia se ha seleccionado el siguiente intercambiador: Intercambiador de calor modelo **HDC**. Es un intercambiador de calor específicamente diseñado para enfriamiento de líquidos industriales



Figuras 2.6 Intercambiador de calor comercial seleccionado.

Bomba del fluido refrigerante. (B-02, B-03)

La bomba 2 estará conectada al postdigestor y será la encargada de impulsar el digestato al segundo intercambiador de calor para que este actúe como líquido refrigerante y ayude a disminuir la temperatura de la vinaza. La bomba deberá impulsar un caudal constante de 65m³/h a una altura de unos 26m; deberá tener al menos una potencia de 7,5 kW. Una vez que el digestato cumpla con su función de reducirle la temperatura al sustrato bomba B-03 enviará el digestato al tanque de almacenamiento T-02 donde se almacenará para luego el digestato para ser usado como fertirriego.

Para este servicio se ha seleccionado una bomba centrífuga vertical modelo ZGTPYBY 100wq65-26-7.5.

Tabla 2.8 Bomba del fluido refrigerante. (B-02)

Bomba del fluido refrigerante. (B-02)	
Empresa	ZGTPYBY
Modelo	100wq65-26-7.5
Materiales	Cuerpo: Hierro fundido/acero inoxidable
Presión máxima de trabajo	De alta presión
Temperatura Max de trabajo	110 °C
Caudal máximo	65m ³ /h
Altura máxima de impulsión	26m
Potencia nominal	7,5kW

Las bombas centrífugas con conexión de aspiración y descarga se utilizan para el bombeo de líquidos en sistemas de calefacción y enfriamiento, estas pueden utilizarse en un amplio rango de temperaturas. El diseño de la bomba incluye un sistema de extracción superior que facilita el desmontaje del cabezal del motor con fines de mantenimiento El cuerpo de la bomba es de Hierro fundido, el eje e impulsor de acero inoxidable.



Figura 2.7 Bomba del fluido refrigerante. (B-02).

2.4.8 Selección de predigestor (cilíndrico).

Una vez el sustrato ha cumplido los tres días (TRH) produciendo biogás en los reactores UASB) es introducido al predigestor por la parte superior del mismo. En términos generales, los predigestores consisten en un tanque de digestión como tal, térmicamente aislado, además de un sistema de mezclado y sistemas de descarga para los sedimentos y el digestato.

El tanque de predigestión será cilíndrico y estará situado sobre tierra. Se ha dimensionado con un volumen que corresponda con el tiempo de retención de diseño (12h) y un espacio vacío suficiente para acumular las espumas que se producen y que estas no pasen al circuito de gas. Por lo tanto, el volumen total del predigestor, 454 m³, comprende el volumen útil de digestión y un % de seguridad (borde libre), el equivalente a un 20 % del volumen útil calculado.

Cálculo del volumen del reactor.

En la literatura, se encuentran diversas metodologías para la realización de diseños de biodigestores, dependiendo de la tecnología, tipo y procedimientos, los autores (Hernán Quiroz Marchant;Cristián de la Cerda, 2020) señalan los siguientes parámetros técnicos y operativos que se debe tener en cuenta para el diseño de cualquier biodigestor:

Tiempo de retención hidráulica: 0,5040 días.

Promedio caudal de sustrato de alimentación 3 meses más altos: 900 m³ /día.

Volumen efectivo del digestor (m^3).

Volumen Total del digestor (m^3).

Área del reactor (m^2)

Diámetro de la corona (m).

Utilizando el diámetro obtenido en la Tabla ver (Anexo 2) se determinar las restantes dimensiones del predigestor.

El predigestor dispondrá de una entrada de la mezcla a digerir por la parte superior del tanque. La descarga de la mezcla ya digerida se realiza mediante rebose, se instalará una tubería que pueda descargar al tanque de digestato por la parte superior y una tubería media que servirá para recircular el digestato hacia el tanque de alimentación si fuera necesario. Además, deberá tener una descarga de lodos en el fondo del digestor,

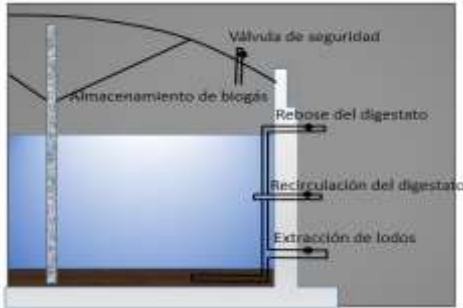


Fig. 2.8 Predigestor cilíndrico.

Todas estas entradas y salidas deben tener instaladas sus propias llaves de paso y sus respectivos medidores de caudal.

El digestor que se propone funciona de forma continua, es decir, se alimenta continuamente y no suele ser vaciado a lo largo de su vida útil. El equilibrio hidráulico viene determinado, por tanto, por la alimentación al digestor y la colocación de las tuberías de entrada y salida del mismo. Al introducir la mezcla, está continuamente ir desplazando el volumen líquido existente en el interior del digestor, rebosando por la salida la misma cantidad de mezcla ya digerida. Para asegurar dicho equilibrio hidráulico es necesario fijar la altura a la que estará colocada la tubería de salida de la mezcla digerida, ya que será la boca de salida de esta conexión la que determine el nivel del líquido existente en el digestor. Por lo tanto, el rebose de la conexión de salida deberá coincidir con la altura del líquido en el digestor, es decir a 4,7 m.

Se construirá en hormigón armado resistente a filtraciones de agua en ambiente expuesto químicamente (Hormigón C35/45 (HA-35)). El hormigón contará con recubrimiento protector a base de pintura con base epoxi en zona de contacto con el gas. El digestor estará cubierto por láminas plásticas para almacenar el biogás en el digestor (gasómetro). El análisis del mismo se realizará en el apartado siguiente. Las características que se han seleccionado para el digestor se resumen a continuación:

Tabla 2.9. Descripción del digestor anaerobio dimensionado

<i>PREDIGESTOR ANAEROBIO</i>	
Materiales de construcción	Hormigón armado
Forma	Cilíndrico soterrado
Cubierta (gasómetro)	Doble membrana plástica
V _{útil de digestión}	455 m ³
Diámetro	11 m
Altura _{útil de digestión}	3,7 m
V _{biodigestor+(20% de seguridad)}	476 m ³
Altura	4.5 m

V _{biodigestor real}	499 m ³
Espesor pared	0,3 m
Aislamiento Térmico	0,1 m poliuretano expandido

Agitador del tanque de predigestión (A-01, A-02, A-03).

Para la homogenización del sustrato en el predigestor debe incluirse un sistema de agitación al digestor.

García L. F. (2016) sugiere que los principales objetivos que debe tener la agitación son:

1. Poner en contacto el sustrato fresco de la alimentación con la población microbiana y a la vez que exista una densidad uniforme de las mismas.
2. Para la distribución uniforme de calor y nutrientes dentro del digestor. - Ayudar con la extracción de las burbujas de biogás producidas por las bacterias metanogénicas.
3. Evitar la formación de costras, espumas y la sedimentación en el interior del digestor.
4. Disminución en la formación de espacios muertos que reducen el volumen efectivo del digestor.

Selección de agitador comercial.

Para el predigestor se ha optado por un sistema de agitación mecánica vertical con motor sumergible ya que son los más ampliamente utilizados en plantas de biogás agrícolas. La potencia del equipo se ha seleccionado mediante la fórmula de cálculo de la potencia de agitación.

Cálculo de la potencia de agitación.

En este caso se ha calculado una potencia de agitación de 0.8 kW. Por lo tanto, se optó por instalar en el postdigestor 1 agitador sumergible de baja velocidad el cual posee una potencia nominal de 1,5 kW, ya que este posee grandes características técnicas que son favorables para la homogenización de grandes cantidades de sustrato. este el impulsor será por recomendación del fabricante, para líquidos con un porcentaje de sólidos <10 %, de 1,5 m de diámetro. Producen un flujo menos turbulento, pero una acción de cizallamiento más alta por kW consumido.



Figura 2.9 Modelo AGS 200-3SHG

La autora [14] plantea, además, que este tipo de agitadores es de gran uso para hacer frente a las condiciones de funcionamiento críticas (por ejemplo, después de un corte de corriente). A continuación, se presentan las características principales del agitador:

Tabla 2.10. Características del agitador seleccionado

Modelo AGS 200-3SHG	
Unidades	1
RPM	40
Voltaje (V)	400
Frecuencia (Hz)	49
Diámetro hélice (mm)	600
P2 (kW)	1,5

A continuación, se presentan los materiales para su construcción:

Tabla 2.11 Materiales

Materiales construcción	
Carcasa	Inox AISI 316 L
Cable eléctrico	Neopreno H07RN/F
Eje	Inox AISI 420
Hélice	Inox AISI 316 L
Tornillería	Inox AISI 316 L

Bomba sumergible de alimentación (B-03).

Se escogerá la misma bomba del epígrafe anterior Bomba sumergible de alimentación (B-03).la cual es la encargada de impulsar el sustrato del postdigestor al tanque de almacenamiento del digestato T-02 y enviar efluente a los intercambiadores de calor para disminuir temperatura de la vinaza antes que entre al tanque de recepción T-01.

2.4.9 Área de purificación del biogás.

Selección Planta de purificación.

Filtro de H₂S (F- H₂S).

Soplador biogás (S-B)

El soplador escogido es el encargado de impulsar el biogás desde la cubierta del postdigestor hacia la planta de purificación de H₂S. Este deberá comprimir el biogás a una presión tal que éste pueda fluir fácilmente por la línea, superando las pérdidas de carga producidas, además deberá aportarle la presión requerida por la unidad de ciclo combinado. La presión a la salida del compresor deberá ser, por tanto, la presión del biogás requerida por la planta de purificación (50 mbar) más las pérdidas totales de presión producidas en la línea (14, mbar). Por tanto:

$$P_2 = P_{CHP} + P_{perd} = 5027 \text{ Pa} \dots\dots\dots (33)$$

El soplador deberá impulsar un caudal constante de 1152 m³/h desde una presión de 50 mbar hasta una presión de 50,27 mbar y deberá tener al menos una potencia de 11kW. Para este servicio se ha seleccionado un soplador de la marca MAPRO® que proporciona diferentes modelos especializados en

la impulsión de biogás. En concreto se ha seleccionada un soplador de canal lateral. Este tipo de sopladores aumentan la presión del gas aspirado gracias a la fuerza centrífuga proporcionada por el impulsor.

Tabla 2.12 Soplante: biogás

Soplante: biogás	
Empresa proveedora	MAPRO
Modelo	Canal lateral
Materiales de construcción	Cuerpo: Ac. Inox Eje/Impulsor: Ac. Inox.
Tipo de motor	Inducción
Presión estática máxima	50 mbar
Caudal máximo	1250 m ³ /h
Potencia nominal	11 kW



Fig. 2.10. Soplador de canal lateral. Marca MAPRO®

Área de Cogeneración.

Unidad de cogeneración (CHP).

La investigadora [14] plantea que una de las formas de aprovechar el biogás para la generación de energía térmica y eléctrica es efectuando la instalación de una unidad de cogeneración CHP (generación simultánea de calor y electricidad). En casi todos los casos, esto significa utilizar unidades de CHP en paquetes pequeños, donde el biogás se quema en un motor de combustión interna acoplado a un generador. (Figura 2.11)



Figura 2.11 Unidad de CHP QUANTO con representación del interior de la unidad de CHP QUANTO. Fuente: web [www: tedom.com](http://www.tedom.com)

Además de estos elementos un módulo CHP consiste en sistemas de intercambio de calor para la recuperación de energía térmica de los gases de escape, circuitos de aceite de lubricación, sistemas hidráulicos para la distribución del calor y conmutación eléctrica, así como un equipo de control para la distribución de la potencia y el control de la unidad CHP.

Para el cálculo de la potencia eléctrica a instalar en el equipo de cogeneración se analizó primeramente el contenido energético del biogás producido y a partir de este se ha estimado la potencia eléctrica a generar, a continuación, se presenta una tabla resumen con los resultados:

Tala 2.13. Contenido energético del biogás

Contenido energético del biogás	
Producción de biogás (60% CH4)	28 213 m ³ /día
Poder calorífico biogás (60%)(PCI)	6,65 kWh/m ³
Rendimiento eléctrico/ térmico CHP	30/50
Horas de funcionamiento	7 200h/año
Energía primaria en el biogás	235 127 kWh/día
Potencia primaria en el biogás	9 797 kWh/día
Energía eléctrica generada por día	67 711kWh/día
Potencia eléctrica a instalar	139 194 kWh/día
Energía térmica generada por día	110 031 kWh/día
Energía eléctrica generada al año	14 388 630 kWh/año
Energía térmica generada al año	33 855 600 kWh/año

Selección del grupo de cogeneración.

De acuerdo con el criterio de selección de los grupos de cogeneración explicados en la obra de la autora [14] se decide seleccionar un grupo de cogeneración de la empresa TEDOM, que pone a disposición una gama completa de módulos de cogeneración especializados en biogás. En concreto se ha seleccionado el modelo QUANTO debido a sus elevadas prestaciones: no requiere obra civil, estos poseen gran flexibilidad y posibilidad de reubicación, tiempos rápidos de instalación y puesta en marcha y sencillez de interconexión con los sistemas existentes.

Se trata de contenedores compactos insonorizados realizados de acero al carbono, diseñados y fabricados para instalaciones exteriores. En él se encuentran alojados los siguientes elementos:

El motor endotérmico, el transformador de resina y, además, los cuadros de mando y control, la rampa de biogás, cuya misión será el correcto abastecimiento del gas al motor, formada por, filtros de gas, dos válvulas de corte, indicador de fugas, reguladores de presión, protección antideflagración, soplador y conexión de gas en acero, el silenciador y chimenea realizados en acero inoxidable, para reducir las emisiones acústicas y la expulsión de los humos de escape, el disipador de emergencia utilizado para

disipar esa parte de la energía térmica que no ha sido recuperada por los equipos de la planta, y un sistema de ventilación, el sistema automático de reabastecimiento de aceite lubricante, formado por un depósito de almacenamiento para el aceite fresco y otro para el gastado, provistos de instrumentación para el recambio de aceite.

Se obtuvieron los datos principales, presentes en la página, catálogos de equipos de cogeneración web de la empresa:

Tabla 2.13.1 Datos de la unidad de cogeneración

ECOMAX 4BIO	
Potencia eléctrica P_e	5 300kW
Potencia térmica recuperable máx. V_{max}	7995 kW
Rendimiento eléctrico η_{elec}	42,7%
Rendimiento térmico η_t	46,1%
Potencia introducida, Q	2000 kW
Consumo de combustible PCI	5 274 kW
Presión gas en la alimentación	50-200 mbar

Requerimientos a verificar.

1. Que la potencia eléctrica instalada sea algo mayor que la calculada:

$$P_{eléctrica} \text{ calculada} = 2\,939 \text{ kWh/día}$$

$$P_{eléctrica} \text{ instalada} = 5\,300 \text{ kW}$$

2. Que la potencia que necesita este motor, sea menor que la que el biogás puede proporcionar con la cantidad producida diariamente. $P_{motor} < P_{Biogás}$.

$$P_{motor} = 2000 \text{ kW}$$

$$P_{Biogás} = 28\,213 \text{ kW}$$

Si la potencia requerida por el motor es menor que el biogás producido diariamente, $P_{motor} < P_{Biogás}$ y se cumple el punto 1 anteriormente planteado entonces se puede afirmar que el generador escogido funcionará correctamente y cumplirá los requisitos técnicos para el correcto funcionamiento eléctrico de la planta. Luego se procede a comprobar si cumple los requisitos térmicos.

3. El motor debe suplir las necesidades térmicas de la planta.

Como las necesidades térmicas de la planta son 4 898 kWh/día y como la potencia térmica máxima recuperable del motor es 7 995 kWh/día, este requisito también lo cumple.

4. El motor tendrá que cumplir con el valor del Rendimiento Eléctrico Equivalente mínimo para las instalaciones de cogeneración con biogás procedente de la digestión anaerobia (Grupo a.1.3;

Subgrupo b.7.2 en el Real Decreto 661/2007 de Producción de Energía Eléctrica en Régimen Especial).

Rendimiento Eléctrico Equivalente

$$REE = \frac{E}{Q - \frac{V}{Ref H}} > 45\% \dots\dots\dots (29)$$

$$REE = \frac{5\,300\,kW}{2000 - \frac{11031kW}{0,9}} > 45\%$$

$$REE = 0,52$$

Donde:

E: es la energía eléctrica generada, bornes del generador.

Q: es el consumo de energía primaria medida por el P.C.I.

V: es la energía térmica útil.

Ref H: valor de referencia del rendimiento para la producción separada de calor, este parámetro toma un valor de 0,9.

Puesto que este motor cumple con los requisitos tanto de REE, como de demanda térmica, es apto para esta instalación de cogeneración.

2.4.10 Área de almacenamiento del digestato.

Tanque de almacenamiento de digestato (T-02).

En este tanque se almacenarán los sustratos digeridos que se extraen de la parte superior del digestor.

El volumen del tanque dependerá, por tanto, del volumen del afluente al digestor y del aprovechamiento que se le pueda dar al digestato. El volumen de almacenaje deberá ser suficiente para mantenerlo entre 1 y 4 meses antes de su distribución como fertirriego. Para determinar el volumen del mismo se ha seleccionado un tiempo de retención de 30 días, y el flujo másico que entrará al mismo será de 227m³/día.

Volumen efectivo del Tanque de almacenamiento de digestato (T-02). $V_E = 2\,270\,m^3$

Volumen Total del Tanque de almacenamiento de digestato (T-02). $V_T = 2\,497\,m^3$

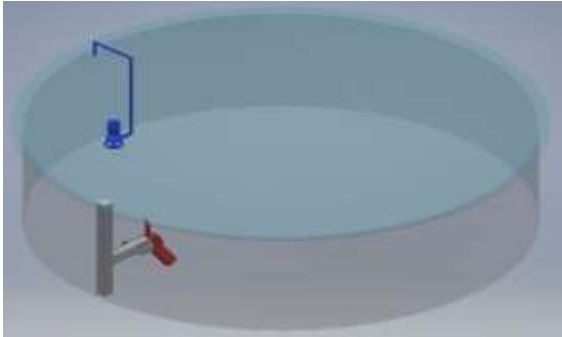
Área del Tanque de almacenamiento de digestato (T-02). $A = 416\,m^2$

Diámetro de la corona del Tanque de almacenamiento de digestato (T-02). $D = 23\,m$

El tanque de almacenamiento del sustrato T-02, al igual que los anteriores similarmente dimensionados será circular y estará situado sobre tierra, se ejecutará en hormigón armado. La autora [14] plantea que el tanque debe estar impermeabilizado por una lámina de plástico o cualquier otro sistema que garantice el sellado y la impermeabilización total del tanque. Además, para preservar el valor fertilizante del

digestato, el tanque estará cubierto, así se evita la entrada de agua de lluvia y la volatilización del amoníaco. La cubierta será de hormigón armado. Las características que se han seleccionado para este tanque se resumen a continuación:

Figura 2.13.1 Tanque de recepción dl digestato.



Cálculo de la potencia de agitación.

$$P_{Agitación} = 3,3(kW)$$

En este caso se ha calculado una potencia de agitación de 0.8 kW. Por lo tanto, se optó por instalar en el postdigestor 1 agitador sumergible de baja velocidad el cual posee una potencia nominal de 3,4kW, ya que este posee grandes características técnicas que son favorables para la homogenización de grandes cantidades de sustrato.



Figura 2.13.2 Agitador sumergible Modelo AGS 400-3SHG.

Tabla 2.13.2 Características del agitador seleccionado

Modelo AGS 200-3SHG	
<i>Unidades</i>	1
<i>RPM</i>	710
<i>Voltaje (V)</i>	400
<i>Frecuencia (Hz)</i>	49
<i>Diámetro hélice (mm)</i>	400
<i>P2 (kW)</i>	3,4

Tabla 2.13.3 Materiales

Materiales construcción	
Carcasa	Inox AISI 316 L
Cable eléctrico	Neopreno H07RN/F

Eje	Inox AISI 420
Hélice	Inox AISI 316 L
Tornillería	Inox AISI 316 L

Bomba sumergible de alimentación (B-03).

Se escogerá la misma bomba del epígrafe anterior Bomba sumergible de alimentación (B-03).la cual es la encargada de impulsar el digestato al lecho de lodos.

Tabla 2.14. Características del tanque de almacenamiento de digestato

Tanque del almacenamiento digestato - Descarga	
Materiales de construcción	Hormigón Armado
Forma	Forma circular soterrado
Altura	6 m
Diámetro	22,9 m
Vtanque real	2470,2 m3
Espesor pared	0,3 m.
Cubierta del tanque	Hormigón Armado

2.4.11 Diseño del Lecho de secado.

De acuerdo al criterio de [15] una instalación para tratamiento en lechos de secado consiste en los lechos (con sus puntos de entrada de los lodos), un sistema de drenaje y almacenamiento de los lixiviados, un lugar fuera de los lechos donde guardar los lodos secos (donde continúan su deshidratación) y posiblemente tanques de sedimentación y espesamiento. Por otro lado, un tanque de acopio o sedimentación puede ser instalado, donde llegan todos los lodos, para luego bombearlos a sus lechos correspondientes.

Se debe colocar un deflector para prevenir la erosión de la arena y asegurar una distribución uniforme de los lodos. Generalmente, la forma constructiva de los lechos es rectangular, cavados en el suelo y cuentan con fondos sellados que se inclinan hacia su sistema de drenaje. De esta manera, los lixiviados fluyen donde reciben tratamiento adicional, lo que es necesario debido a su alto contenido de sólidos suspendidos, material orgánico y nutrientes, antes de su uso productivo o descarga en el ambiente, según la calidad requerida. Se decide diseñar un lecho que recibirá lodos con una concentración de 60 gTS/L, en la cantidad de 50 m³/día, en un lugar con buenas condiciones climáticas. Se verterán los lodos de lunes a sábado, durante 52 semanas del año. La masa anual de lodos recibidos puede calcularse mediante la ecuación siguiente.

$$M = C_i \cdot Q_i \cdot t \dots\dots\dots (34)$$

$$M = 60 \cdot 50 \cdot 6 \cdot 52$$

$$M = 936\,000 \text{ (kg TS/año).}$$

Donde:

M= la carga anual de lodos (kg TS/año).

C_i = el promedio de la concentración de sólidos totales en los LF (g TS/L).

Q_i = el flujo diario de entrega ($\text{m}^3/\text{día}$).

t = el número de días de entrega en el año.

Como las condiciones climáticas son favorables se puede aplicar una tasa de carga de 200 kg TS/ $\text{m}^2/\text{año}$. Se requiere para los lechos una extensión total de 73 000 kg TS/ año / 200 kg TS/ $\text{m}^2/\text{año}$ = 365 m^2 . Con capas de lodos de 0,20 m y un flujo diario de 50 $\text{m}^3/\text{día}$, se debe contar con una extensión de 500 $\text{m}^2/\text{día}$. Para que no existan problemas de sobreproducción y para un mejor manejo los de mismos por parte de los operarios se decide implementar 5 lechos de 50 m de longitud y 10 m de ancho, estos lechos poseerán una pendiente de un grado para la recirculación del líquido que queda una vez que se han secado los sólidos. El tiempo de secado será de 14 días. Por lo tanto, se requieren 5 camas para el lecho, el cual tendrá una superficie total 500 m^2

Tabla 2.15. Geometría del Lecho de Secado.

Geometría del Lecho de Secado	
Parámetros	Valores
Longitud (m)	50
Ancho (m)	10
Alto (m)	1
Área del lecho (m^2)	500
Profundidad del lodo aplicado (m)	0,20

Tabla 2.15.1 Tiempo de llenado del Lecho de Secado.

Tiempo de llenado del Lecho de Secado	
Parámetros	Valores
Flujo del lodo ($\text{m}^3/\text{día}$)	50
Masa del lodo(kg TS/año).	73 000
Densidad del lodo(kg/L)	1,2
Profundidad del lodo aplicado (m)	0,20
Volumen del lecho(m^3)	19
Tiempo de llenado(días)	11

Tabla 2.15.2 Tiempo de Secado Requerido.

Tiempo de Secado Requerido.	
$T = \frac{30 \cdot H \cdot S_0}{aE - bR} \left[\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2} \right] + t_d$	Valores

H=profundidad a la cual se aplica el lodo(m)	0,20
S ₀ =sólidos iniciales(%)	60
a=corrección de la tasa de evaporación	0,75
E=tasa de evaporación (m/mes)	4,6
b=fracción de agua absorbida	0,58
R=lluvias durante el mes húmedo(mm/mes)	1,31
S ₁ =sólidos después de t _d (%)	64
S ₂ =contenido final de solidos(%)	114
t _d =tiempo en el cual el drenado es significativo(días)	3

Tiempo de secado.

$$T = \frac{30 \cdot H \cdot S_0}{aE - bR} \left[\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2} \right] + t_d \dots\dots\dots (35)$$

Tabla 2.15.3 Tiempo total

Tiempo total	
Parámetro	Valor
Tiempo total (llenado + secado), (días)	25



Figura 2.13.3 Lecho de lodos

2.4.12 Selección del gasómetro.

La selección del gasómetro habitualmente viene dada por los requerimientos de almacenamiento y variaciones en la producción del biogás. En general, se puede dimensionar considerando una elongación máxima para EDPM (membrana) de un 20% por sobre el volumen total del digestor, pero puede variar considerablemente dependiendo de los consumos y generación. (Anexo 4) Para el Cálculo de Volumen del Gasómetro, se debe considerar la siguiente ecuación junto a un factor de seguridad (F.S.) entre 10% a 20%:

Volumen del Gasómetro.

$$V_{gasómetro} > Q_p \cdot (1 - T_c) \cdot 0,24 \dots\dots\dots (36)$$

$$V_{gasómetro} > 28\,213 \text{ m}^3/\text{día} \cdot (1 - 9/24) \cdot 0,24$$

$$V_{gasómetro} > 4\,232 \text{ m}^3/\text{día}$$

Cálculo para un factor de seguridad de 15%

$$F \cdot S_{gasómetro} = 4\,232 \text{ m}^3/\text{día} \cdot 15\% \dots\dots\dots (37)$$

$$F \cdot S_{gasómetro} = 634,8 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$V_{gasómetro} = 4\,232 \text{ m}^3/\text{día} + 634,8 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$V_{gasómetro} = 4\,867 \text{ m}^3/\text{día}$$

Una vez obtenido los cálculos se selecciona un gasómetro esférico el cual se situará después de la planta de purificación de biogás, optimizando así los temas de espacio y disposición de los implementos de la planta. En concreto se ha elegido para el gasómetro esférico una cubierta del tipo doble membrana. El gasómetro de doble membrana está compuesto por una membrana exterior encargada de darle forma y por una membrana interior, que cumple con la función de cerrar herméticamente el fermentador.

Un soplante de aire de apoyo en funcionamiento continuo transporta el aire en los espacios vacíos manteniendo así la presión constante independientemente de la producción y la demanda del biogás. La presión en los espacios vacíos cumple con la función de conservar la forma de la membrana exterior garantizando así que el gasómetro sea resistente a todo tipo de carga externa.

En la siguiente imagen se puede apreciar una imagen de los gasómetros de doble membrana ofrecidos por la marca alemana SATTLER:



Figura 2.14 Gasómetro esférico de doble membrana plástica. Fuente: Vitoria Gasteiz.SA

Las características del gasómetro quedan resumidas en la tabla 2.16

Tabla 2.16. Características de la cubierta del digestor-gasómetro.

Gasómetro	
Tipo	Doble membrana
Forma	Esférica
Diámetro	18,68 m
Altura del gasómetro	15,43
Capacidad efectiva	4 980m ³
Presión máxima	25 mbar

Elementos de seguridad de la planta

Ante la posibilidad de que alguno de los sistemas de control fallase y no permitiera al operario reaccionar frente algún problema en el proceso, se debe aprovisionar la planta con algunos sistemas de seguridad.

Válvula de seguridad del gasómetro

Por razones de seguridad los tanques de almacenamiento de gas tienen que estar dotados de válvulas de alivio para la presión exigida y para la presión negativa, de modo que se impidan cambios severos de presión no permitidos dentro del gasómetro. Si en algún momento se produjese un aumento de la presión del biogás en el gasómetro que pudiera producir algún defecto en el mismo, la válvula de seguridad abrirá el circuito de forma automática cuando llegue a una presión de consigna (20 mbar). Para tal fin se ha seleccionado una válvula de alivio de vacío y presión con arrestallamas incluido de la marca Varec Biogás modelo 5810B. Están diseñadas para la instalación en cubierta de digestores anaerobios de baja presión. La válvula de alivio protege la cubierta de presión y vacío excesivo dentro del tanque. La válvula arrestallamas protege al gasómetro de accidentes por ignición de gas, está diseñada para detener la propagación de la llama de fuentes externas.



Fig. 2.15 Válvula combinada de alivio de presión y arrestallamas marca VAREC BIOGAS.

Antorcha de seguridad.

La evacuación de biogás a la atmósfera por la válvula de seguridad se debe realizar tan solo en casos extremos. Normalmente, la salida se ha de hacer de manera controlada, quemando el gas en una antorcha de seguridad para no liberar CH₄ sino CO₂ (producto de la combustión). El CH₄ tiene un efecto

invernadero 21 veces superior al CO₂. También puede ser conveniente enviar el gas a la antorcha manualmente en momentos de puesta en marcha, de parada o, en general, en operaciones de mantenimiento.

La selección de la antorcha se realiza de forma que el caudal máximo de biogás (152,37 Nm³/h) pueda quemarse a presión nominal (funcionamiento continuo). La potencia de la antorcha se regula en función del poder calorífico del biogás y de la cantidad. La antorcha seleccionada es una antorcha estándar para plantas de biogás y gases residuales. Debido a la combustión cerrada, consigue una eficiencia de combustión superior al 99%. Además, como la llama es oculta, permite su instalación inclusive cerca de zonas residenciales. Se ha seleccionado el modelo IFL1c 180 (Caudal de biogás máx. 1176 m³/h) estándar de la marca Hofstetter:



Figura 2.16 Antorcha de seguridad modelo HOF GAS- IFL1c 180 de la marca Hofstetter

Los quemadores se deben instalar sobre una plataforma estable metálica o de concreto localizada lo suficiente alejada del digestor y de cables o tuberías aéreas. La distancia mínima recomendada para la instalación es 30 metros del digestor. A continuación, se resumen sus principales características:

Tabla 2.17 Descripción de la antorcha de seguridad

Antorcha seguridad	
Caudal de biogás máximo	1800 Nm ³ /h
Capacidad del quemador máximo	1350 kW
Brida de conexión	65 DN
Presión de entrada mínima	25 mbar
Peso	500 kg

2.4.13 Selección de los sistemas de conducción de la planta.

En el epígrafe se procede a la descripción de las líneas presentes en la planta, se definirán las conducciones de cada línea, en cuanto a materiales y diámetros, así como los elementos presentes en las mismas. Además, se analizan las pérdidas de carga debidas a cada elemento presente en la línea

para finalmente seleccionar los equipos de impulsión necesarios para el funcionamiento de la planta. Ver (Anexo 5)

La forma de expresar las características geométricas del tubo, es mediante el valor de la denominada SDR (Relación de Dimensiones Estándar), siendo:

$$SDR = \frac{D}{e} \dots \dots \dots (38)$$

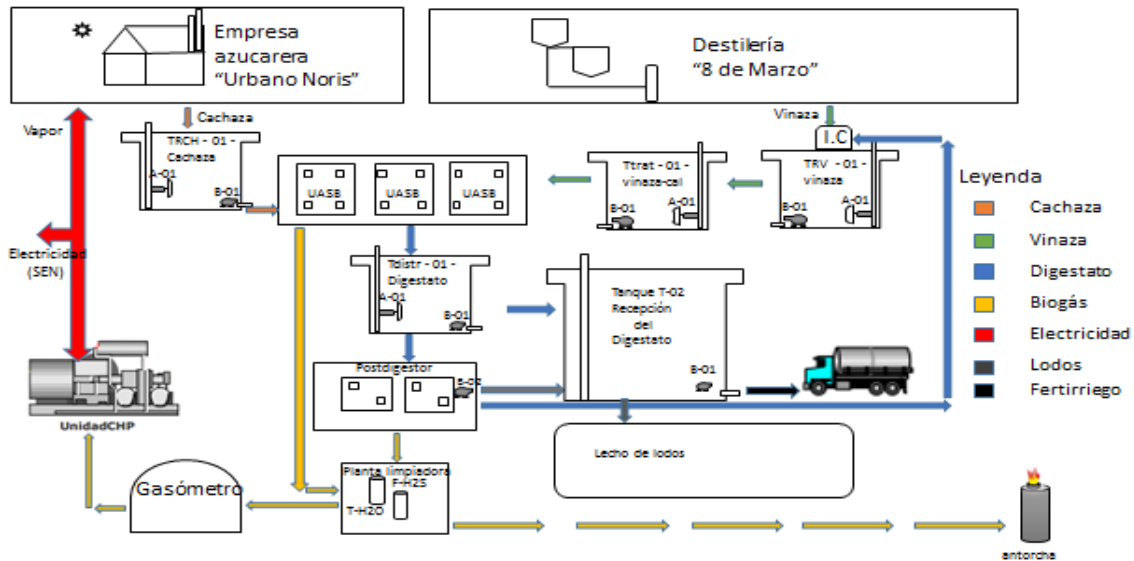


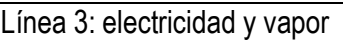



Fig.2.17 Diagrama flujo de la planta. Fuente: el autor

Tabla 2.18 Descripción de las líneas de la planta.

Línea	Fluido	Descripción de línea
Línea 1: Alimentación del T-01 	Sustrato	Transporta al sustrato desde el tanque de mezcla (T-01) hasta los reactores UASB, luego transporta al sustrato hasta el postdigestor.
Línea 2: Descarga del digestato 	Digestato	Transporta al digestato hacia el tanque de almacenamiento (T-02), transporta el lodo al lecho de lodo, y envía digestato al I.C para disminuirle la temperatura a la vinaza.
Línea 3: electricidad y vapor 	vapor	Transporta vapor a bajas presiones desde el módulo de cogeneración hasta la destilería y la empresa azucarera. Y genera electricidad para el SEN.
Línea 4: Biogás 	Biogás	Transporta el biogás desde la cubierta del digestor hasta la planta de purificación, luego al gasómetro y de allí al grupo de cogeneración (CHP).

Válvulas.

Las válvulas son dispositivos que sirven para regular o impedir la circulación del fluido por una conducción. Es imprescindible que cada cierto tramo de tuberías se instale llaves de paso de cierre rápido y de media vuelta para el cierre del flujo. También se debe instalar válvula antirretorno, antes y después de cada elemento de la instalación. De esta manera se puede llevar a cabo cualquier tarea de limpieza o reparación. Ver (Anexo 6)

Operación y mantenimiento.

El mantener una máquina o equipo hasta su fallo parcial o total puede acarrear grandes consecuencias no solo a nivel económico o productivo de cualquier entidad. La pérdida de producción por la falta de mantenimiento puede impactar de manera directa en el servicio al cliente; especialmente en aquellas empresas cuyos entornos de producción son los de fabricar contra pedido.

En las empresas que fabrican contra una posición de stock (entiéndase, fabrican para recomponer el inventario), una parada de máquinas o de planta pueden impactar en los inventarios de seguridad que la empresa haya definido. Por lo tanto, el área de mantenimiento NO es un sector en el que un mecánico arregla-todo. Es en todo caso, un sector que bien administrado, genera un aporte importante para la rentabilidad de la empresa. No solo porque mantiene funcionando los equipos productivos, sino porque colabora junto a los maquinistas, a los encargados y a los ingenieros de planta a mejorar las eficiencias productivas.

Algunas de las medidas que se deben tener en cuenta a la hora de darle mantenimiento a una planta de biogás son:

1. Inspecciones periódicas del estado de la cubierta, buscando detectar fugas, rasgaduras y daños en general.
2. Realizar una remoción de basura y escombros arrastrados por el viento.
3. Eliminar inmediatamente cualquier acumulación de agua de la cubierta.
4. Extracción de los lodos acumulados en la parte baja del biodigestor para evitar el azolvamiento y la operación incorrecta.
5. Mantenimiento programado de motogenerador, bombas, sopladores y todos los equipos, de acuerdo a las recomendaciones de los proveedores.
6. Regeneración o sustitución de filtros de acuerdo a las indicaciones del proveedor o fabricante.

2.5 Fase 3. Evaluación y Viabilidad del diseño.

El objetivo de la evaluación económica y de rentabilidad es el de estimar cual es el presupuesto necesario para el diseño y construcción de la planta de biogás agroindustrial, para así poder determinar de cuánto será la inversión total con el fin de realizarle un balance económico a la planta y poder estimar el tiempo que tardaremos en amortizar dicha inversión. En el capítulo III se realiza el cálculo económico de equipos.

Conclusiones parciales del capítulo II.

En el capítulo se desarrollan las dos primeras fases del diseño, que parten de la caracterización de los residuales a procesar, la toma de decisiones tecnológicas, el dimensionamiento de los equipos principales por áreas, la selección de los equipos auxiliares y culmina con recomendaciones básicas para la operación y mantenimiento de la planta.

Por su valor práctico deben resaltarse las siguientes apreciaciones:

1. Se formuló una propuesta tecnológica para el diseño de una planta de biogás que aprovechara los residuos vinaza-cachaza de la destilería “8 de marzo” y la empresa azucarera “Urbano Noris”.
2. Se consideran aportes al diseño de este tipo de plantas:
 - La concepción de una etapa para el pre-tratamiento de la Cachaza a partir del empleo simultáneo de tratamiento alcalino y térmico.
 - El establecimiento de una etapa de post-tratamiento para agotar los componentes contaminantes de los residuos e incrementar la producción específica de biogás.
3. El volumen de los tanques de recepción de vinaza permitirá eliminar la laguna de oxidación y con ello mitigar los impactos sobre la comunidad aledaña.
4. La unidad de cogeneración seleccionada produce simultáneamente calor y energía eléctrica. Su evaluación por normas vigentes para regímenes especiales de generación de electricidad muestra su correspondencia con los requisitos impuestos, tanto de rendimiento eléctrico equivalente como de demanda térmica.
5. El material predominante para el sistema de tuberías fue el PVC de alta densidad por su resistencia a la corrosión, baja conductividad térmica frente a temperaturas extremas, flexibilidad, bajo peso, facilidad de instalación, bajo costo y baja rugosidad superficial (no solo por la reducción de las pérdidas hidráulicas sino por las peculiaridades del trasiego de estos materiales y las posibilidades de obstrucción).

6. La instalación diseñada está compuesta por dos tanques de recepción, uno para cada residuo, y cinco reactores (tres para la etapa de tratamiento y dos para el post-tratamiento). Se concibió, además, un tanque de recepción y distribución que se ubica entre las dos etapas para garantizar que el efluente cumpla los tiempos de retención hidráulico en cada una de ellas.

CAPÍTULO III. APLICACIÓN DE PROPUESTA DE TECNOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTOR ANAEROBICO

3.1 Propuesta de Diseño de Reactor Anaerobio tipo UASB

En este epígrafe se realizaron los cálculos pertinentes para determinar los principales parámetros de diseño del reactor UASB y de sus componentes. Para realizar la propuesta de diseño del reactor anaeróbico tipo UASB, primeramente, se partió de los datos recogidos de la destilería y del central del municipio Urbano Noris.

Tabla 3.1. Datos de entrada obtenidos del central y la destilería de Urbano Noris.

Indicador	Vinaza
Producción de Vinaza (m ³ /d)	900
Brix (° Bx)	6 – 9
SDT (% w/v)	5 – 7
SST (% v/v)	1 – 2
DQO_V (kg/m ³)	60 - 80
DBO_V (kg/m ³)	20 - 30
COV (kg/m ³ * d)	20
pH	4,5 – 5,0
Temperatura (° C)	80 - 100
Salinidad (kg/m ³)	15 – 25

3.1.1 Cálculos geométricos del reactor

–El Volumen Total del reactor se calcula mediante la Ecuación

$$V_T = \frac{Q_{inf} * DQO_V}{COV}$$

Donde:

V_T : Volumen Total del reactor, (m³).

Q_{inf} : es el caudal del influente, (m³/d).

DQO_V : es el DQO de la vinaza, (kg DQO/m³).

COV : es la carga orgánica volumétrica de la vinaza, (kg DQO/m³ * d).

$$V_T = \frac{900 \text{ m}^3/\text{d} * 70 \text{ kg}/\text{m}^3}{20 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ d}}$$

$$V_T = 3\ 150 \text{ m}^3$$

–Tiempo de Retención Hidráulico

$$TRH = \frac{V_T}{Q_{inf}}$$

$$TRH = \frac{3\,150\,m^3}{900\,m^3/d}$$

$$TRH = 3,5\,d = 84\,h$$

Para lograr una puesta en marcha y un mantenimiento más fácil el caudal del influente no puede exceder de $500\,m^3/d$ [7]. Por lo que, debido a que se producen $900\,m^3/d$ de vinaza, se proponen 3 unidades de reactores.

$$V_R = \frac{V_T}{N_R}$$

Donde:

N_R : Número de reactores.

$$V_R = \frac{3\,150\,m^3}{3}$$

$$V_R = 1\,050\,m^3$$

–Área del reactor:

$$A_R = \frac{V_R}{H_R}$$

Donde:

A_R : es el área del reactor, (m^2)

H_R : es la altura líquida del reactor, (m).

La altura líquida del reactor es la altura del influente en el interior del reactor. Se propone que esta altura sea de 4,5 m. Teniendo en cuenta que las cajas de distribución se deben de instalar a una altura de 0,5 de la superficie del líquido, la altura total del reactor es de 5 m.

$$A_R = \frac{1\,050\,m^3}{4,5\,m}$$

$$A_R = 233,334\,m^2$$

–Lados del Reactor:

Se escoge la forma del reactor cuadrada para una mayor facilidad en los cálculos.

$$L_R = \sqrt{A_R}$$

Donde:

L_R : es la longitud de uno de los lados del reactor, (m).

$$L_R = \sqrt{233,334 \text{ m}^2}$$

$$L_R = 15,275 \text{ m}$$

Redondeando la longitud de los lados del reactor, $L_R = 15 \text{ m}$.

–Velocidad ascensional

$$V_{asc} = \frac{H_R}{TRH}$$

Donde:

V_{asc} : es la velocidad ascensional del influente, (m/h).

$$V_{asc} = \frac{4,5 \text{ m}}{84 \text{ h}}$$

$$V_{asc} = 0,0536 \text{ m/h}$$

De esta forma el reactor UASB quedaría como se muestra en la Figura 3.1.

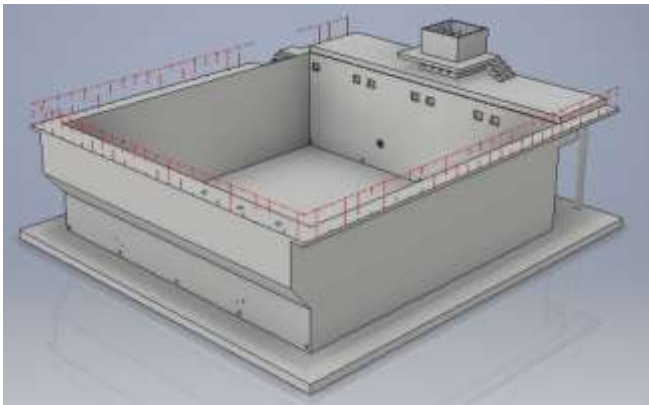


Figura 3.1. Isométrica del reactor UASB de la planta de biogás.



Figura 3.2. Representación de las entradas y salidas en el reactor.

3.1.2. Cálculos de los Separadores Trifásicos

Para el diseño de los separadores trifásicos, se deben de tener en cuenta los siguientes requisitos indicados por [16] y [7].

1. La pendiente debe de ser de 45° a 60° .
2. El área superficial de la apertura entre los separadores trifásicos debe de ser un (15-20) % del área superficial del reactor.
3. La altura del separador GLS debe de ocupar entre el (15-30) % de la altura total del reactor.
4. La superposición de los deflectores instalados debajo de las aperturas debe de ser 15-20 cm para evitar que las burbujas de gas ascendentes no entren en el separador trifásico.

–Área de Apertura

$$A_{apert} = \frac{Q_{inf}}{V_{asc\ GLS}}$$

Donde:

A_{apert} : es el área de apertura disponible para el paso del líquido entre los separadores trifásicos, (m^2).

$V_{asc\ GLS}$: es la velocidad ascensional del líquido en los separadores trifásicos, (m/h). Esta velocidad no debe de ser mayor de 2 m/h [7].

$$A_{apert} = \frac{12,5\ m^3/h}{0,4\ m/h}$$

$$A_{apert} = 31,25\ m^2$$

Esta área de apertura es el área mínima necesaria para el paso del líquido entre los separadores trifásicos, por lo que, teniendo en cuenta el requisito número dos se decide optar un área de apertura de 15 % el área del reactor. $A_{apert} = 35\ m^2$.

–Área Total de la base de los separadores GLS:

$$A_{TGLS} = A_R - A_{apert}$$

Donde:

A_{TGLS} : es el área total de la base de los separadores GLS, (m^2).

$$A_{TGLS} = 233,334\ m^2 - 35\ m^2$$

$$A_{TGLS} = 198,334\ m^2$$

–Número de Separadores Trifásicos

No existe una norma fija para decidir un número óptimo de unidades de separadores GLS, pero la sencillez de construcción es un aspecto muy importante a la hora de escoger la cantidad de unidades de separadores GLS [7].

En el presente trabajo se optó por instalar cinco unidades de separadores con el objetivo de diseñarlos con dimensiones más pequeñas.

–Área de cada separador GLS

$$A_{GLS} = \frac{A_{TGLS}}{N_{GLS}}$$

$$A_{GLS} = \frac{198,334 \text{ m}^2}{5}$$

$$A_{GLS} = 39,667 \text{ m}^2$$

–Ancho de los separadores GLS

$$W_{GLS} = \frac{A_{GLS}}{L_{GLS}}$$

Donde:

W_{GLS} : es el ancho de los separadores GLS, (m).

L_{GLS} : es el largo del separador GLS, $L_{GLS} = L_R$.

$$W_{GLS} = \frac{39,667 \text{ m}^2}{15 \text{ m}}$$

$$W_{GLS} = 2,6 \text{ m}$$

–Altura del Separador GLS:

La altura del separador GLS debe ser (15-30) % la altura total del reactor.

$$h_{GLS} = H_R * 0,3 = 4,5 * 0,3$$

$$h_{GLS} = 1,35 \text{ m}$$

–Ángulo de las paredes del Separador GLS

Este ángulo debe de estar entre (45-60)^o para que actúe como un buen dispositivo sedimentador de lodos [7].

Calculando el arcotangente del ángulo α_{GLS} que se muestra en la Figura 3.3

0,68 y 0,35: son constantes empíricas [17].

$$\eta_{DQO} = 100 * (1 - 0,68 * (84)^{-0,35} h)$$

$$\eta_{DQO} = 86 \%$$

$$\eta_{DBO} = 100 * (1 - 0,7 * TRH^{-0,5})$$

Donde:

η_{DBO} : es la eficiencia de remoción del DBO, (%).

TRH : es el tiempo de retención hidráulica, (h).

0,7 y 0,5: son constantes empíricas [17].

$$\eta_{DBO} = 100 * (1 - 0,7 * (84)^{-0,5} h)$$

$$\eta_{DBO} = 92 \%$$

3.1.4. Estimación de la concentración final del efluente

La concentración con la que sale el efluente del interior reactor se determina a partir de las eficiencias de remoción del DQO y DBO.

$$DQO_{final} = DQO_V - \frac{\eta_{DQO} * DQO_V}{100}$$

Donde:

DQO_{final} : es la concentración del DQO en el efluente final, ($kg DQO/m^3$).

$$DQO_{final} = 70 kg/m^3 - \frac{86 * 70 kg/m^3}{100}$$

$$DQO_{final} = 10 kg/m^3$$

$$DBO_{final} = DBO_V - \frac{\eta_{DBO} * DBO_V}{100}$$

Donde:

DBO_V : es la demanda biológica de oxígeno de la vinaza, ($kg DQO/m^3$).

DBO_{final} : es la concentración del DBO en el efluente final, ($kg DQO/m^3$).

$$DBO_{final} = 25 kg/m^3 - \frac{92 * 25 kg/m^3}{100}$$

$$DBO_{final} = 2 kg/m^3$$

3.1.5. Cálculo de la Producción de Biogás

La producción de biogás puede ser determinada a partir de la estimación de la cantidad de DQO que se convierte en metano en el interior del reactor.

$$DQO_{CH_4} = Q_{inf} * (DQO_V - DQO_{final}) - Y * Q_{inf} * DQO_V$$

Donde:

DQO_{CH_4} : es la cantidad de DQO convertida en metano, (kg/d).

Y : es el coeficiente de producción de sólidos en el sistema, (0,11 – 0,23) $kg DQO_{sludge}/kg DQO_{appl}$ [17].

$$DQO_{CH_4} = 900 \text{ m}^3/d * (70 - 10) \text{ kgDQO/m}^3 - 0,21 \frac{\text{kgDQO}}{\text{kgDQO}_{appl}} * 900 \text{ m}^3/d * 70 \text{ kgDQO/m}^3$$

$$DQO_{CH_4} = 40\ 770 \text{ kg/d}$$

Luego de calcular la carga de DQO que se convierte en metano, se determina la producción de metano.

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K_T}$$

Donde:

Q_{CH_4} : es la producción volumétrica de metano, (m^3/d).

K_T : es el factor de corrección de la temperatura operacional del reactor, ($kg DQO/m^3$).

$$K_T = \frac{P_0 * K_{DQO}}{R * T}$$

Donde:

P_0 : es la presión atmosférica.

T : es la temperatura operacional del reactor, (K).

K_{DQO} : es el DQO correspondiente a 1 mol de metano, (0,064 $kg DQO/mol$).

R : constante de los gases, (0,08206 $atm * L/mol * K$).

$$K_T = \frac{1 \text{ atm} * 0,064 \text{ kg DQO/mol}}{0,08206 \text{ atm} * L/mol * K * 310 \text{ K}}$$

$$K_T = 2,516 \text{ kg DQO/m}^3$$

$$Q_{CH_4} = \frac{40\ 770 \text{ kg/d}}{2,516 \text{ kg DQO/m}^3}$$

$$Q_{CH_4} = 16\ 205 \text{ m}^3/d$$

Una vez obtenida la producción volumétrica de metano se puede calcular la producción de biogás indicando que el biogás obtenido de la vinaza contiene aproximadamente un 60 % de metano.

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{CH_4}}{0,6}$$

Donde:

$Q_{biogás}$: es la cantidad de biogás que se produce diariamente, (m^3/d).

$$Q_{biogás} = \frac{16\,205\text{ m}^3/d}{0,6}$$

$$Q_{biogás} = 27\,000\text{ m}^3/d$$

3.1.6. Cálculos de la Distribución del afluente

–Número de Tubos de Distribución

El número total de tubos dirigidos a distribuir homogéneamente el efluente el interior del reactor está determinado por el área del reactor y el área de influencia de cada distribuidor.

$$N_T = \frac{A_R}{A_D}$$

A_D : es el área de influencia de cada distribuidor, (m^2).

Para el presente caso se seleccionó un área de influencia de cada distribuidor de $2,34\text{ m}^2$.

$$N_T = \frac{233,34\text{ m}^2}{2,34\text{ m}^2}$$

$$N_T = 100$$

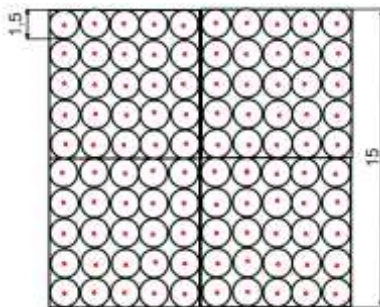


Figura 3.5. Puntos de distribución del influente en la base del reactor.

–Diámetro de los tubos de distribución

La experiencia práctica ha demostrado que, para evitar la obstrucción de sólidos en los tubos, se han utilizado diámetros de 75 a 100 mm. [17].

En el presente trabajo se escoge el diámetro de los tubos de distribución de 100 mm.

–Dimensionamiento de las cajas de distribución

Se optó por la instalación de cuatro cajas de distribución, cada una de las cuales tendrá un total de 25 tubos de distribución.

Al reactor entra un caudal de $300\text{ m}^3/d$ o $12,5\text{ m}^3/h$, distribuyéndose en las cajas de distribución, las cuales deben de ser capaces de albergar los $12,5\text{ m}^3$ en una hora, por lo que dividiendo este volumen entre la cantidad de cajas de distribución, se obtiene el volumen que debe de tener una sola caja. Teniendo en cuenta que la altura de las cajas de distribución es de 1 m:

$$V_{caja} = \frac{V}{N_{caja}}$$

Donde:

V_{caja} : es el caudal que entra en una sola caja de distribución, (m^3/h).

$$V_{caja} = \frac{12,5 m^3/h}{4}$$

$$V_{caja} = 3,125 m^3/h$$

$$A_{caja} = \frac{V_{caja}}{H_{caja}}$$

Donde:

A_{caja} : es el área de la caja de distribución, (m^2).

H_{caja} : es la altura de la caja de distribución, (m).

$$A_{caja} = \frac{3,125 m^3}{1 m}$$

$$A_{caja} = 3,125 m^2$$

La forma de la caja de distribución será rectangular, por lo que:

$$A_{caja} = a * b$$

Donde:

a : es el ancho de la caja de distribución, (m).

b : es el largo de la caja de distribución, (m).

Se propone que el ancho sea de 1,5 m, entonces:

$$b = \frac{A_{caja}}{a} = \frac{3,125 m^2}{1,5 m}$$

$$b = 2 m$$

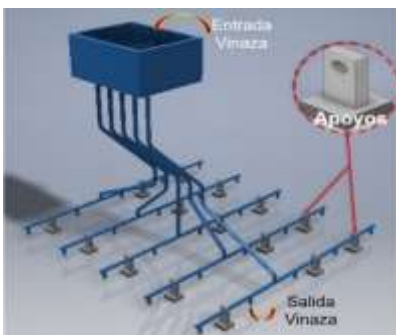


Figura 3.6. Isométrica de la caja de distribución del afluente y los apoyos.

3.1.7 Cálculos de las tuberías de conducción del biogás

Teniendo en cuenta que se obtienen $27\ 000\ m^3/d$ de biogás, y que la velocidad de conducción del biogás por las tuberías no debe ser mayor de $3,5\ m/s$, [17].

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{biogás\ Total}}{N_R}$$

Donde:

$Q_{biogás\ Total}$: es la cantidad total de biogás que se obtiene en los dos reactores UASB de postratamiento.

$$Q_{biogás} = \frac{27\ 000\ m^3/d}{3}$$

$$Q_{biogás} = 9\ 000\ m^3/d = 0,1042\ m^3/s$$

El área de la sección transversal de la tubería de conducción del biogás es:

$$A_{tc} = \frac{Q_{biogás}}{v_c}$$

Donde:

A_{tc} : es el área de las tuberías de conducción del biogás, (m^2).

v_c : es la velocidad de conducción del biogás por las tuberías, (m/s).

$Q_{biogás}$: es el caudal de biogás obtenido, (m^3/s).

$$A_{tc} = \frac{0,1042\ m^3/s}{3,5\ m/s} = 0,0297\ m^2$$

El diámetro de la tubería de conducción del biogás es:

$$d_{tc} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{tc}}{\pi}}$$

Donde:

d_{tc} : es el diámetro de las tuberías de conducción del biogás, (m).

$$d_{tc} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0297\ m^2}{\pi}}$$

$$d_{tc} = 0,195\ m = 195\ mm$$

Por lo tanto, se escoge un diámetro de tubería de $200\ mm$

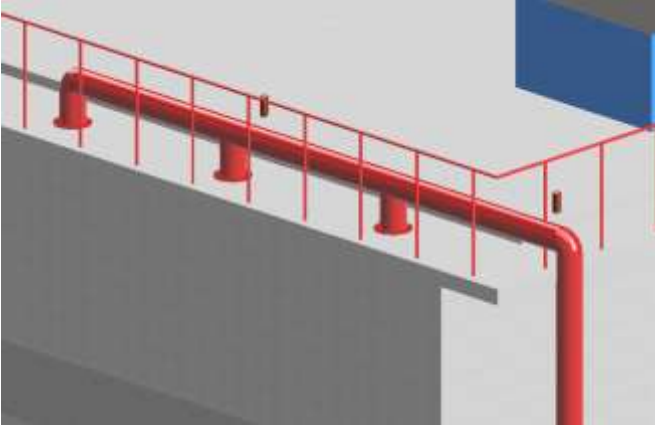


Figura 3.7. Tubería de conducción del biogás a la salida del reactor UASB.

3.1.8. Cálculo de los canales de recolección del efluente (Gutters)

Se instalarán dos canales de recolección, uno a cada lado de cada separador trifásico, por lo tanto, serán 8 canales de recolección. La altura de los canales se escoge de 0,38 m y conociendo que tendrán un largo igual al largo del reactor y el caudal es de $12,5 \text{ m}^3/h$:

$$V_{canal} = \frac{V_T}{N_{canales}}$$

Donde:

V_{canal} : es el volumen de un solo canal de recolección, (m^3).

V_T : es el volumen total horario, ($12,5 \text{ m}^3$).

$N_{canales}$: es el número de canales de recolección.

$$V_{canal} = \frac{12,5 \text{ m}^3}{8}$$

$$V_{canal} = 1,5625 \text{ m}^3$$

El ancho del canal de recolección es:

$$a_c = \frac{V_{canal}}{H_{canal} * L_R}$$

Donde:

a_c : es el ancho del canal de recolección, (m).

H_{canal} : es la altura del canal de recolección, (m).

L_R : es el largo del reactor, (m).

$$a_c = \frac{1,5625 \text{ m}^3}{0,38 \text{ m} * 15 \text{ m}}$$

$$a_c = 0,27 \text{ m}$$

Multiplicando el ancho por un factor de seguridad de $\eta = 1,2$,

$$a_c = 0,27 \text{ m} * 1,2$$

$$a_c = 0,32 \text{ m}$$

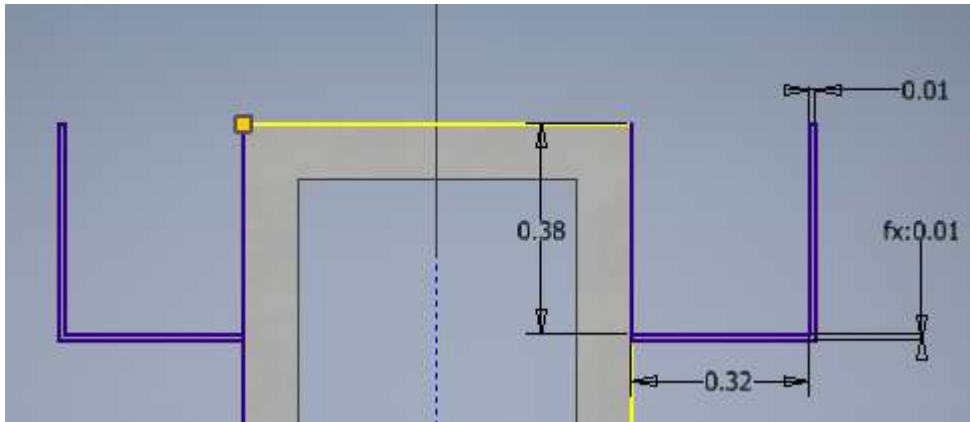


Figura 3.8. Dimensiones de los Gutters del Reactor.

3.1.9. Sistema de Descarga de la Cachaza

El sistema de descarga permite evacuar la cachaza contenida en el reactor luego pasado el tiempo de retención de sólidos, y también permite que los lodos que se producen en el reactor producto de las bacterias se descarten periódicamente.

Para esto se deben instalar a diferentes alturas; la primera fila de tubos debe de estar ubicada a 0,2 m sobre el sistema de inyección del afluente y el último a 0,05 m debajo de los deflectores [7].

En el este trabajo se instalarán teniendo en cuenta lo anterior, dos tuberías de descarte debajo de cada unidad de separadores trifásicos, el diámetro de los tubos debe de ser de 150 mm de diámetro como mínimo y deben de tener una tubería de aireación. (Figura 3.9)

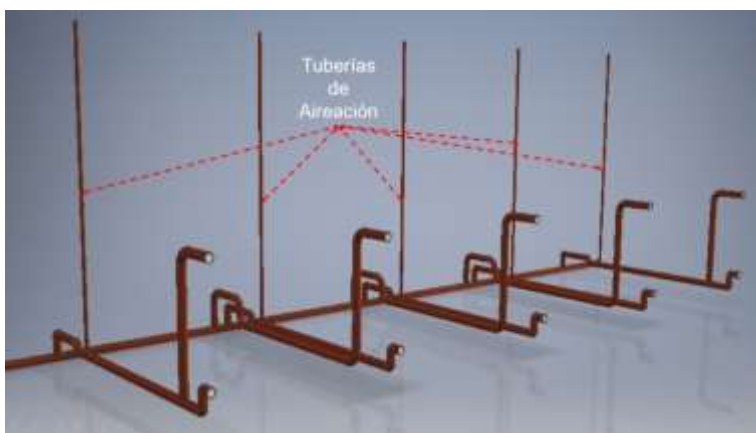


Figura 3.9. Sistema de Descarga del biol sólido.

3.2 Funcionamiento del Reactor UASB

La destilería “8 de Marzo” ubicada en el municipio Urbano Noris de la provincia de Holguín, Cuba; con una capacidad de producción de alcohol de 500 hL, genera entre 800-900 m^3/d de vinaza. La vinaza o afluente luego de enfriarse y agregarle nutrientes y cal, entra a los reactores UASB, (Figura 3.10). La vinaza entra en la caja de pre distribución (1), en la cual se distribuye a cuatro tuberías de 150 mm de diámetro (2), las cuales dirigen el afluente a las cajas de distribución (3) y lo distribuyen lo más homogéneamente al fondo del reactor a través de tuberías de 100 mm de diámetro (4), (Figura 3.11).

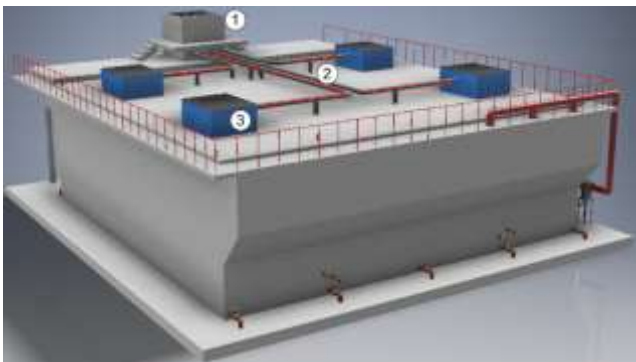


Figura 3.10. Flujo de la Vinaza en el Reactor UASB.

Como se observa en la Figura 3.11, las tuberías de la caja de distribución se encuentran sujetas al fondo del reactor por apoyos que impiden su movilidad. De esta forma el afluente se pone en contacto con la cachaza (residuo del central Urbano Noris) y las bacterias que degradan la materia orgánica de la vinaza y producen el biogás. Luego el afluente comienza un flujo ascendente hasta la parte superior del reactor, se representa con líneas verdes en (5).

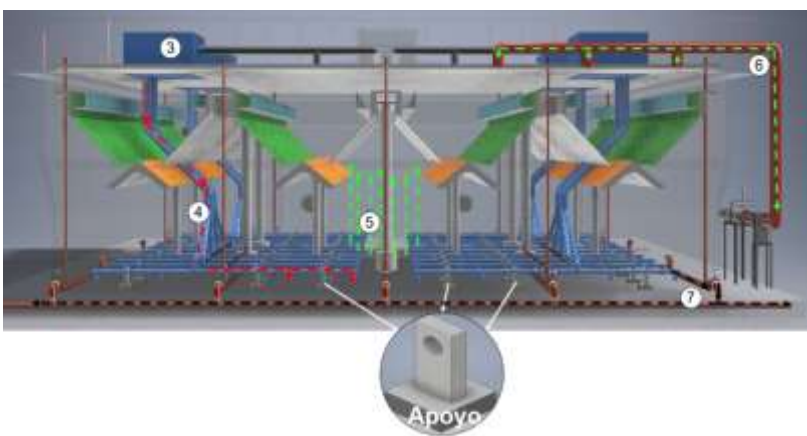


Figura 3.11. Flujo de la Vinaza y el Biogás en el interior del Reactor UASB.

La vinaza al tener una alta cantidad de materia orgánica, es capaz de generar una mayor cantidad de biogás, estas burbujas de biogás ascienden, agitan la cachaza en el fondo del reactor generando un

mayor contacto entre las bacterias y luego se recolecta el biogás en el separador trifásico, se dirigen al compartimento de recolección del biogás situado en la parte frontal del reactor, Figura 3.12 y se envía el biogás a su purificación por la tubería en (6).

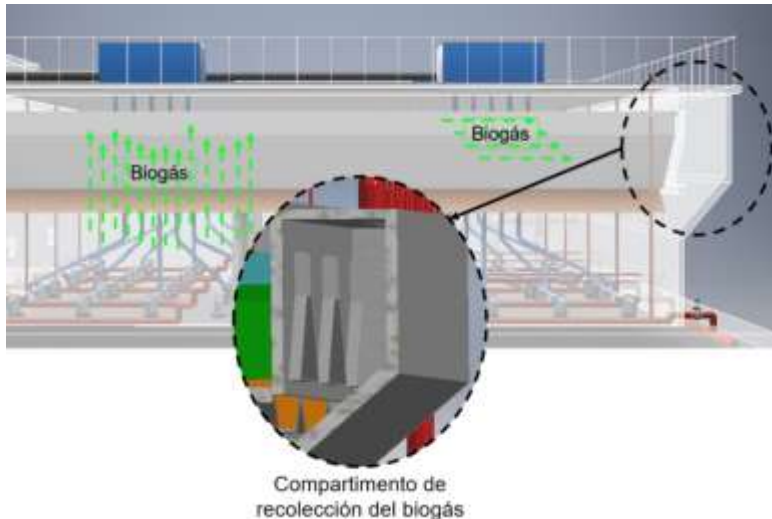


Figura 3.12. Vista del compartimento de recolección frontal del biogás.

Los separadores trifásicos en conjunto con los deflectores impiden que los gránulos de cachaza que suben (debido a que las burbujas de biogás se adhieren a estas y por el flujo ascendente del afluente) sean lavados al exterior del reactor, o sea que se vayan con el efluente.

La cachaza luego de pasar 40 días en el interior del reactor, se extrae por medio de las tuberías en (7) hasta los lechos de secado para que realice un proceso de compostaje antes de ser utilizada como abono sólido de calidad en la agricultura.

A los costados de los separadores trifásicos se encuentran los canales que recolectan el efluente y lo sacan del reactor UASB para dirigirlo hacia un tanque de recepción de $1\ 800\ m^3$, se almacena y se envía mediante bombas a otro reactor UASB donde se le aplica un proceso de postratamiento.

3.3 Proceso de Postratamiento Anaeróbico

El proceso de postratamiento anaeróbico se aplica con los siguientes objetivos:

- Disminuir la concentración del DQO y DBO teniendo en cuenta las exigencias locales;
- Eliminar los microorganismos patógenos restantes que no fueron eliminados en el proceso;
- Disminuir la concentración de nutrientes como en nitrógeno y el fósforo;
- Eliminar el metano restante disuelto en el efluente líquido luego del tratamiento anaeróbico.

El efluente luego de aplicarle el tratamiento anaeróbico en los tres reactores UASB sale con una concentración de $DQO_{final} = 10 \text{ kg/m}^3$ y $DBO_{final} = 2 \text{ kg/m}^3$ como se calculó en el epígrafe (2.3.4) con eficiencias de remoción de 86 % y 92 % respectivamente.

Por lo que, con los objetivos antes mencionados, se propone aplicar para el caso en cuestión un proceso de postratamiento mediante la implementación de otro reactor tipo UASB.

3.4 Reactor UASB de Postratamiento Anaeróbico

Implementando la misma metodología de cálculo desarrollada en el epígrafe 2.3, se procede a realizar una propuesta de diseño del reactor UASB de postratamiento.

Cálculos Geométricos

Teniendo que cuenta que el caudal es mayor de $500 \text{ m}^3/\text{d}$, se proponen dos reactores UASB para realizar la etapa de postratamiento.

–Volumen del Reactor

$$V_T = \frac{Q_{inf} * DQO_V}{COV} = \frac{900 \text{ m}^3/\text{d} * 10 \text{ kg/m}^3}{20 \text{ kg/m}^3\text{d}}$$

$$V_T = 450 \text{ m}^3$$

–Tiempo de Retención Hidráulico

$$TRH = \frac{V_T}{Q_{inf}} = \frac{450 \text{ m}^3}{900 \text{ m}^3/\text{d}}$$

$$TRH = 0,500 \text{ d} = 12 \text{ h}$$

$$V_R = \frac{V_T}{N_R} = \frac{450 \text{ m}^3}{2}$$

$$V_R = 225 \text{ m}^3$$

–Área del Reactor

$$A_R = \frac{V_R}{H_R} = \frac{225 \text{ m}^3}{4,5 \text{ m}}$$

$$A_R = 50 \text{ m}^2$$

–Longitud de los Lados del Reactor

$$L_R = \sqrt{A_R} = \sqrt{50 \text{ m}^2}$$

$$L_R = 7 \text{ m}$$

–Velocidad Ascensional

$$V_{asc} = \frac{H_R}{TRH} = \frac{4,5 \text{ m}}{12 \text{ h}}$$

$$V_{asc} = 0,3714 \text{ m/h}$$

Quedando el cuerpo del reactor UASB de postratamiento como muestra la Figura 3.13.

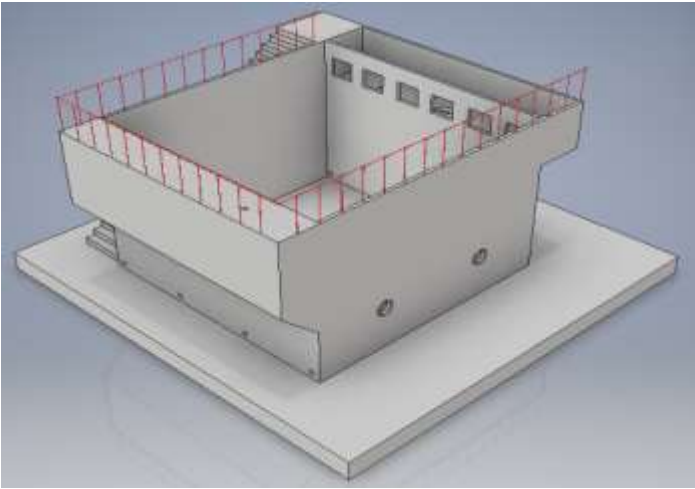


Figura 3.13. Isométrica del reactor UASB de postratamiento.

Cálculos de los Separadores Trifásicos

–Área de Apertura

$$A_{apert} = \frac{Q_{inf}}{V_{asc} GLS} = \frac{18,75 \text{ m}^3/h}{2 \text{ m/h}}$$

$$A_{apert} = 9,375 \text{ m}^2$$

–Área Total de la base de los separadores GLS:

$$A_{TGLS} = A_R - A_{apert} = 50 \text{ m}^2 - 9,375 \text{ m}^2$$

$$A_{TGLS} = 40,625 \text{ m}^2$$

–Número de Separadores Trifásicos

En el presente trabajo se optó por instalar cuatro unidades de separadores para los reactores UASB de postratamiento.

–Área de cada separador GLS

$$A_{GLS} = \frac{A_{TGLS}}{N_{GLS}} = \frac{40,625 \text{ m}^2}{4}$$

$$A_{GLS} = 10,156 \text{ m}^2$$

–Ancho de los separadores GLS

$$W_{GLS} = \frac{A_{GLS}}{L_{GLS}} = \frac{10,156 \text{ m}^2}{7 \text{ m}}$$

$$W_{GLS} = 1,40 \text{ m}$$

–Altura del Separador GLS:

$$h_{GLS} = H_R * 0,25 = 4,5 * 0,25$$

$$h_{GLS} = 1,125 \text{ m}$$

–Ángulo de las paredes del Separador GLS

$$\alpha_{GLS} = \text{Arcotang} \left(\frac{h_{GLS}}{(W_{GLS}/2)} \right) = \text{Arcotang} \left(\frac{1,125 \text{ m}}{0,7 \text{ m}} \right)$$

$$\alpha_{GLS} = \text{Arcotang}(1,607)$$

$$\alpha_{GLS} = 58^\circ$$

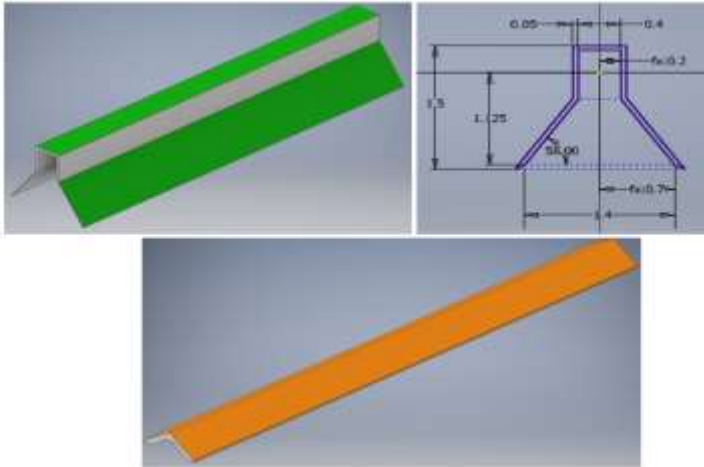


Figura 3.14. Isométrica y croquis del separador trifásico y deflector del reactor UASB de postratamiento.

–Estimación de las Eficiencias de Remoción

Eficiencia de remoción del DQO:

$$\eta_{DQO} = 100 * (1 - 0,68 * TRH^{-0,35}) = 100 * (1 - 0,68 * (12)^{-0,35} h)$$

$$\eta_{DQO} = 72 \%$$

Eficiencia de remoción del DBO:

$$\eta_{DBO} = 100 * (1 - 0,7 * TRH^{-0,5}) = 100 * (1 - 0,7 * (12)^{-0,5} h)$$

$$\eta_{DBO} = 80 \%$$

–Estimación de la concentración final del efluente luego del Postratamiento

$$DQO_{final} = DQO_V - \frac{\eta_{DQO} * DQO_V}{100} = 10 \text{ kg/m}^3 - \frac{72 * 10 \text{ kg/m}^3}{100}$$

$$DQO_{final} = 2,8 \text{ kg/m}^3$$

$$DBO_{final} = DBO_V - \frac{\eta_{DBO} * DBO_V}{100} = 1,909 \text{ kg/m}^3 - \frac{80 * 1,909 \text{ kg/m}^3}{100}$$

$$DBO_{final} = 0,382 \text{ kg/m}^3$$

Cálculo de la Producción de Biogás durante el postratamiento

–Cantidad de DQO que se convierte en metano

$$DQO_{CH_4} = Q_{inf} * (DQO_V - DQO_{final}) - Y * Q_{inf} * DQO_V$$

$$DQO_{CH_4} = 900 \text{ m}^3/d * (10 - 2,8) \text{ kgDQO/m}^3 - 0,21 \frac{\text{kgDQO}}{\text{kgDQO}_{appl}} * 900 \text{ m}^3/d * 10 \text{ kgDQO/m}^3$$

$$DQO_{CH_4} = 4 590 \text{ kg/d}$$

–Producción de metano

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K_T}$$

$$Q_{CH_4} = \frac{4 590 \text{ kg/d}}{2,56 \text{ kg DQO/m}^3}$$

$$Q_{CH_4} = 1 793 \text{ m}^3/d$$

–Producción de Biogás

$$Q_{biogásPost} = \frac{Q_{CH_4}}{0,6}$$

$$Q_{biogásPost} = \frac{1 793 \text{ m}^3/d}{0,6}$$

$$Q_{biogásPost} = 2 988 \text{ m}^3/d = 124,5 \text{ m}^3/h$$

Por lo tanto, en total entre los tres reactores UASB principales y los dos reactores UASB de postratamiento se producen aproximadamente:

$$Q_{biogás Total} = Q_{biogás} + Q_{biogásPost}$$

$$Q_{biogás Total} = 27 000 \text{ m}^3/d + 2 988 \text{ m}^3/d$$

$$Q_{biogás Total} = 29 988 \text{ m}^3/d = 1 250 \text{ m}^3/h$$

Cálculos de la distribución del afluente

–Número de Tubos de Distribución

$$N_T = \frac{A_R}{A_D} = \frac{50 \text{ m}^2}{2 \text{ m}^2}$$

$$N_T = 25 \text{ tubos}$$

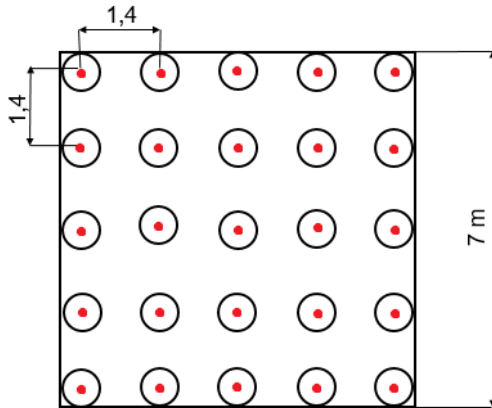


Figura 3.15. Puntos de distribución del influente en la base del reactor de postratamiento.

–Diámetro de los tubos de distribución

En el presente trabajo se escoge el diámetro de los tubos de distribución de 100 mm.

Se optó por la instalación de una sola caja de distribución, la cual tendrá un total, de 25 tubos de distribución.

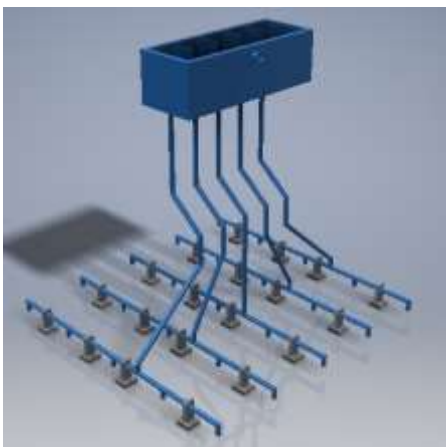


Figura 3.16. Isométrica de la caja de distribución del afluente y apoyos del reactor UASB de postratamiento

–Cálculo de los canales de recolección del efluente (Gutters)

Se instalarán dos canales de recolección, uno a cada lado de cada separador trifásico, por lo tanto, serán 6 canales de recolección. La altura de los canales se escoge de 0,60 m y conociendo que tendrán un largo igual al largo del reactor y el caudal es de $18,75 \text{ m}^3/h$:

$$V_{canal} = \frac{V_T}{N_{canales}} = \frac{18,75 \text{ m}^3}{6}$$

$$V_{canal} = 3,125 \text{ m}^3$$

El ancho del canal de recolección es:

$$a_c = \frac{V_{canal}}{H_{canal} * L_R} = \frac{3,125 \text{ m}^3}{0,60 \text{ m} * 7 \text{ m}}$$

$$a_c = 0,70 \text{ m}$$

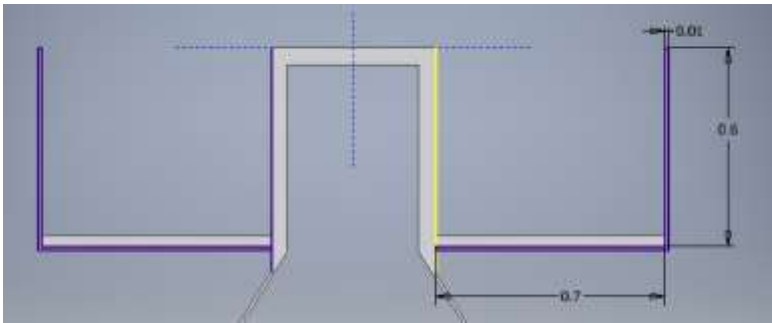


Figura 3.17. Dimensiones de los Gutters del Reactor.

Teniendo en cuenta que se obtienen $2\ 988 \text{ m}^3/\text{d}$ de biogás en los dos reactores UASB de postratamiento, y que la velocidad de conducción del biogás por las tuberías no debe ser mayor de $3,5 \text{ m/s}$, [17].

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{biogás \text{ Total}}}{N_R}$$

$$Q_{biogás} = \frac{2\ 988 \text{ m}^3/\text{d}}{2}$$

$$Q_{biogás} = 1\ 494 \text{ m}^3/\text{d} = 0,0173 \text{ m}^3/\text{s}$$

El área de la sección transversal de la tubería de conducción del biogás es:

$$A_{tc} = \frac{Q_{biogás}}{v_c}$$

$$A_{tc} = \frac{0,0173 \text{ m}^3/\text{s}}{3,5 \text{ m/s}} = 0,0049 \text{ m}^2$$

$$d_{tc} = \sqrt{\frac{4 * A_{tc}}{\pi}}$$

$$d_{tc} = \sqrt{\frac{4 * 0,0049 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$d_{tc} = 0,079 \text{ m} = 79 \text{ mm}$$

Por lo tanto, se escoge un diámetro de tubería de 85 mm .



Figura 3.18. Tubería de biogás del Reactor UASB de postratamiento.

De esta forma, los reactores anaeróbicos anteriores estarán ubicados en la planta de biogás como se muestra en la Figura 3.19. La vinaza proveniente de la destilería pasa a través de un intercambiador de calor en el cual se disminuirá la temperatura de la misma utilizando el sustrato que sale de los reactores de postratamiento, luego entra a los tanques (TRV-1) donde disminuye aún más su temperatura y luego en el tanque (TRV-2) se le agrega la cal para disminuir su pH. El TRV-2 deberá de ser capaz de albergar la vinaza durante dos días, se construirá bajo tierra y en él se le añadirá los nutrientes necesarios y la cal a la vinaza, también tendrá una tubería que conecte con la tubería principal de conducción del biogás debido a que la vinaza estará produciendo biogás durante los dos días que estará en su interior.

Los reactores UASB R1, R2 y R3 son los reactores principales donde se realizará el tratamiento anaeróbico. Estos reactores se alimentan del tanque TRV-2 por medio de bombas situadas dentro de (CB) que es una caseta para proteger las bombas del medio ambiente. Luego de realizado el tratamiento anaeróbico se dirige el efluente a los reactores de postratamiento (RP1 y RP2).

Se propone que antes de dirigir el efluente de los reactores principales hacia los de postratamiento, se sitúe un tanque de recepción y distribución (TRD). (Figura 3.19). Este tanque cumple con la función de recibir el efluente procedente de los reactores 1, 2 y 3, y luego distribuirlo hacia los reactores RP1 y RP2. Debido a la diferencia entre los tiempos de retención hidráulico entre los reactores principales y los de postratamiento (3,5 días y 12 horas respectivamente), se garantiza de esta forma que estos últimos cumplan con su TRH.

El digestato que sale de los reactores RP1 y RP2 intercambia calor con la vinaza proveniente de la destilería y pasa al tanque TRD o tanque de recepción del digestato, el cual puede ser directamente implementado en el fertirriego de las plantaciones de caña.

En cuanto a la cachaza, esta originaria del CAI “Urbano Noris” se almacena en el (TRC) o tanque de recepción de la cachaza, se mezcla con agua y se distribuye a los cinco reactores de la planta de biogás, luego de pasado su tiempo de retención en el interior de los reactores, se transporta al lecho de secado, el cual recircula al TRV-2 la parte líquida con que sale la cachaza de los reactores.

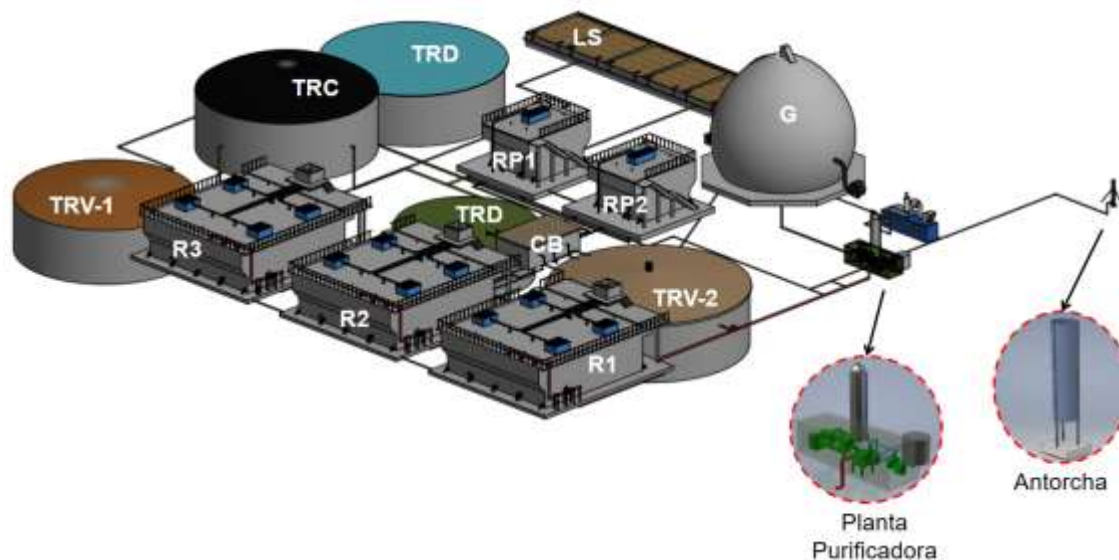


Figura 3.19. Ubicación de los reactores en la Planta de Biogás.

3.5 Evaluación de la factibilidad técnica, socioeconómico, ambiental y energética de la planta diseñada

3.5.1 Evaluación de la factibilidad técnica y socioeconómica

Para determinar los valores energéticos de combustible y electricidad se tomaron como datos los años de zafra 2015-2019. Esto comprende un promedio de cinco años con el objetivo de obtener valores promedios reales de lo que se consume en la destilería. La tabla 3.2, muestra una relación de cinco años de producción de alcohol a 100°.

Tabla 3.2. Valores promedios de electricidad, combustible y días tomados de la destilería

Parámetros	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Año 2019	Promedio
Consumo de electricidad (kW)	856072	589709	999625	565880	1083293	818 915,8
Consumo de Fuel oil (kg)	3400051	2341412	2266612	1551997	3055375	2 523 089,4
Días de producción	350	362	358	362	350	365,4

Días efectivos	284,25	309,36	285,51	328,74	250	291,6
Días inactivos	65,75	52,64	72,49	33,26	99,94	64,8

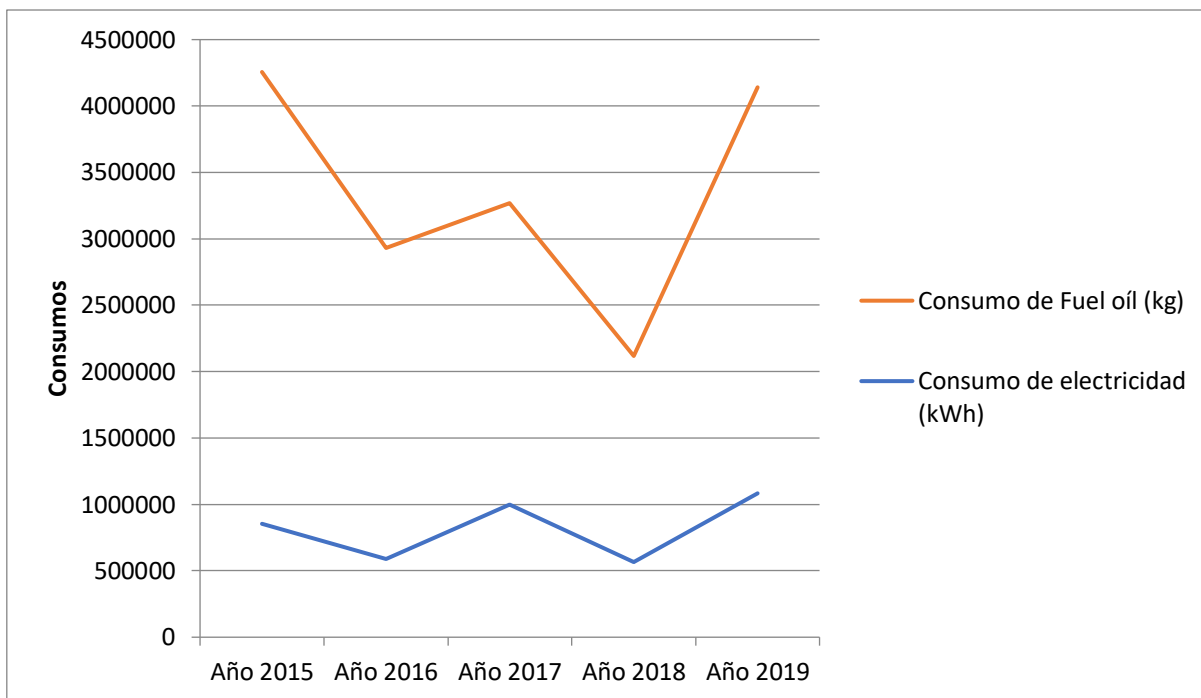


Fig. 3.20. Gráfico de tendencias de consumo en energía eléctrica y combustible.

El gráfico como bien lo indica el mayor consumo está centrado en el combustible por lo que hay que pensar la posibilidad de sustituir completamente este parámetro por producción de biogás.

Una vez obtenido los valores promedios de consumo de energía eléctrica y combustible se le aplica una tasa de costo a cada consumo y se obtienen como resultado los gastos monetarios por concepto de los mismos. Aplicando lo antes expuesto, la siguiente tabla muestra los importes de consumo de corriente y electricidad en los años antes mencionados.

Combustible

Los valores de densidad del combustible fuel oíl oscila entre 0,94-1,05 kg/L. Por tanto tomaremos la densidad de 1 kg/L, de esta forma se traduce que el promedio de consumo del FUEL Oíl según la tabla anterior y aplicando las conversiones pertinentes es de 2 523 089,4 litros anuales.

1 m³ de biogás equivale a 0,7 L de fuel-oíl, por lo que se necesita por equivalencia 3 604 413,4 m³ de biogás para uso como combustible.

Electricidad:

Para consumir en combustible para producir energía (kilowatt-hora), la cantidad varía de una planta u otra según su eficiencia. Se llama consumo específico de combustible y está en un entorno de entre unos 200 gramos para las más eficientes y más de 300 para las más ineficientes.

“De manera aproximada solo con el fin de ilustrar: un kilowatt-hora equivale aproximadamente a un vaso de combustible de 250 g.

“Teniendo en cuenta que una tonelada tiene 4 mil vasos de 250 g, esa medida de combustible le costó al país, en el caso de considerar toda la electricidad producida con el fueloil, cerca de 0.10 USD (solo en combustible, sin contar el resto de los componentes del costo), [18].

Según la media anual de consumo eléctrico en la destilería esta es de 818915,8 kW lo que equivale a 117,6 kW/h por lo que traducido en biogás aplicando el factor de conversión es: 1 m³ de biogás equivale a 1,7 kWh, por lo que se necesita por equivalencia 481 715,17 m³ de biogás para generar electricidad en la destilaria.

A continuación, se muestra una tabla donde muestra los costos de consumo por combustible y electricidad.

Tabla 3.3. Costos por consumo de electricidad y combustible

Parámetros	Consumo anual	Precio en USD	Importe en USD/año
Fuel Oil (kg)	2523089,4	0,4087	1031186,64
Electricidad (kW)	818915,8	0,10	81891,58

Costos base de los equipos

Para realizar el presupuesto económico es necesario conocer el costo de cada equipo que conforman la planta de biogás. Estos costos han sido obtenidos directamente de los proveedores mediante los catálogos oficiales de equipos para plantas de biogás industriales. La metodología utilizada para la estimación de los costos de los equipamientos se realiza los pasos en el mismo orden lógico que se valió la autora García L. F. (2016).

Los resultados obtenidos quedan resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 3.4 Costos de los equipos presentes en la planta.

código	Descripción	Costo en (USD)	Método
A-01	Agitador sumergible de hélice Modelo AGS 300-3SHG	5 000	CATÁLOGO

A-02	Agitador sumergible de baja velocidad Amaprop 2500	4 850	CATÁLOGO
B-01	Bomba sumergible ZGTPYBY modelo 150wq100-7-5.5	9060	CATÁLOGO
B-02	Bomba de fluido refrigerante modelo ZGTPYBY 100wq65-26-7.5.	7100	CATÁLOGO
S-01	Soplador de canal lateral. Marca MAPRO	2 000	CATÁLOGO
ANT	Antorcha de biogás modelo HOF GAS- IFL1c 180	9 200	CATÁLOGO
HCP	Módulo de cogeneración CHP modelo QUANTO D5000	250 000	CATÁLOGO
IC	Intercambiador de calor tipo placa modelo HDC	11 300	CATÁLOGO
GA	Gasómetro doble membrana esférico modelo SATTLER	40 000	CATÁLOGO

El presupuesto de costos de equipos para plantas de biogás industriales asciende a la cantidad de **338 510 USD**.

Presupuesto de ejecución de material (P.E.M.)

El presupuesto económico debe incluir además del costo base del equipo, el resto de materiales necesarios para su instalación, así como la mano de obra necesaria para la misma. Además, se debe considerar los costes indirectos (CI) asociados al transporte, gastos legales, seguros, etc.

Tabla 3.5 Presupuesto ejecución de materiales (USD).

Área 1 : TANQUE DE HOMOGENEIZACIÓN	116 750
OBRA CIVIL DE LOS TANQUES DE RECEPCIÓN DE LA VINAZA	60 000
OBRA CIVIL DEL TANQUE DE RECEPCIÓN DE CACHAZA	27 200
01: Agitador sumergible de hélice Modelo AGS 300-3SHG. (3)	5 000
01: Bomba sumergible ZGTPYBY modelo 150wq100-7-5.5.(3)	4 850
Área 2 : SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL SUSTRATO	18 400
02: Intercambiador de calor tipo placa modelo HDC.	11 300
02: Bomba modelo ZGTPYBY 100wq65-26-7.5	7 100
Área 3: DIGESTOR UASB Y POST DIGESTORES	133 124
OBRA CIVIL DEL REACTOR UASB	50 000
OBRA CIVIL DEL REACTOR DE PRETRATAMIENTO	27 200
OBRA CIVIL DE LOS POSTDIGESTORES	26 374
03.1: Agitador sumergible de hélice Modelo AGS 300-3SHG (3)	5 000
03.2 Agitador sumergible de baja velocidad Amaprop 2500(3)	4 850
Área 4 : SISTEMA DE PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS	117 998
04.1: PLANTA DE PURIFICACIÓN	106 798
04.2: ANTORCHA DE SEGURIDAD MODELO HOF GAS- IFL1c 180	9 200
04.3: SOPLADOR DE BIOGÁS MARCA MAPRO	2 000
Área 5: APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS	290 000

05: MÓDULO DE CHP MODELO QUANTO	250 000
051: GASOMETRO DE DOBLE MEMBRANA	40 000
Área 6 : TANQUE DE ALMACENAMIENTO DIGESTATO	30 300
06: OBRA CIVIL DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO	27 900
06.1: OBRA CIVIL DEL LECHO DE LODOS	2 400
Área 7 : CONDUCCIONES	21 224
07: CONDUCCIÓN DE PVC DN= 100 mm Líneas 1 y 2; sustrato y digestato	5 980
07: CONDUCCIÓN DE PVC DN=150 mm Línea3: vapor a bajas presiones	6 979
07: CONDUCCIÓN DE PVC DN= 200mm Línea 4; Biogás	8 265
PRESUPUESTO EJECUCIÓN DE MATERIALES EN (US).	727 796

El presupuesto de ejecución por material asciende a la cantidad de **727 796 USD**.

Presupuesto de ejecución por contrata (P.E.C.)

Una vez estimado el Presupuesto de Ejecución de Material (P.E.M.) referente al precio de los equipos y su instalación, se calcula el Presupuesto de Ejecución por Contrata, donde se incluyen el Beneficio Industrial, Gastos generales y un 21% de IVA. El valor obtenido refleja el precio real de ejecución del proyecto estimado con un cierto margen de error tanto por exceso como por defecto.

Tabla 3.4 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA P.E.C

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA P.E.C	
Total Presupuesto de Ejecución de Material (P.E.M)	727 796
Gastos Generales (13%)	94 614
Beneficio industrial (6%)	43 668
I.V.A (21%)	152 838
TOTAL P.E.C	1 339 479

El presupuesto de ejecución por contrata asciende a la cantidad de **1 339 479 USD**.

3.5.2 Costos de los componentes y los materiales de los reactores UASB

El análisis económico se realiza teniendo en cuenta el costo de los componentes de los reactores UASB y los materiales con los que son fabricados. En la tabla No. 5 se muestra un resumen de la cantidad de reactores que se proponen.

Tabla 3.6. Resumen de las dimensiones de los Reactores UASB.

Resumen de Estructuras	Unidades	Dimensiones				
		Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Volumen (m ³)	Área (m ²)
Reactores UASB principales	3	15	15	5	1 050	233,34
Reactores UASB de Postratamiento Anaeróbico	2	7	7	5	225	50

Por razones de construcción y de costo, el hormigón y el acero son los materiales más utilizados en los reactores UASB.

El biogás está compuesto por metano, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, etc., siendo estos dos últimos agentes corrosivos. En el interior del reactor donde el biogás es producido es donde ocurren los problemas de corrosión debido a que el concreto y el acero se ven afectados. Los mayores problemas de corrosión se evidencian en la parte superior del reactor donde el biogás se acumula en mayores cantidades. Por lo que se deben de seleccionar materiales con alta resistencia a la corrosión. En la Tabla 3.6 se muestra los principales componentes del reactor UASB y sus materiales.

Tabla 3.7. Principales componentes del Reactor y sus materiales.

Componentes del Reactor UASB		Material
Paredes del Reactor UASB		Hormigón con revestimiento interior de base Epoxi bituminoso
Separador GLS	Compartimento del biogás	Hormigón con revestimiento interior de base Epoxi bituminoso
	Planchas de apertura	PVC
Placas de los canales de recolección del efluente		PVC
Deflectores		Hormigón con revestimiento interior de base Epoxi bituminoso
Tuberías y accesorios (Todas)		PVC
Soportes de los Separadores GLS y de los deflectores		Hormigón con revestimiento interior de base Epoxi bituminoso
Caja de Distribución	Cuerpo de la Caja de distribución	PVC
	Rejilla de protección de la Caja de distribución	Acero Inoxidable
	Apoyos de las Tuberías de la caja de distribución	Concreto

Entre los cinco reactores UASB donde se tratan $900 \text{ m}^3/d$ aplicando un tratamiento anaeróbico, se generan tres productos que pueden ser explotados como una fuente de ingreso (biogás, biol líquido y biol sólido). Se producen $29\,988 \text{ m}^3/d$ de biogás, $900 \text{ m}^3/d$ de biol líquido con una concentración de $2,8 \text{ kg DQO/m}^3$ que puede ser utilizado para el fertirriego de las plantaciones cañeras y biol sólido.

Este biogás que se genera puede ser vendido a la línea directa de gas natural o puede ser sustituido como combustible, pues 1 m^3 de biogás equivale a $0,55 \text{ L}$ de fuel oil, lo que significa que se ahorrarían aproximadamente $16\,500 \text{ L/d}$ de combustible fuel oil y se sustituyen importaciones.

Tabla 3.8. Costo de la Inversión Inicial.

Reactor UASB	Unidades	Cantidad	Precio US\$	Total US\$
Hormigón	m^3	989	77,224	76 374,536

Excavación		m^3	1 160	15	17 400
Revestimiento Epoxi Bituminoso		Latas	15	1,265	19
Planchas de PVC de 10 mm de espesor y 2 m^2 de área		m^2	598	235	140 530
Tubo de \varnothing 85 mm		m	100	9	900
Tubo de \varnothing 100 mm		m	1 150	12	13 800
Tubo de \varnothing 150 mm		m	770,1	15	11 551,5
Tubo de \varnothing 63 mm		m	300	6,73	2 019
Tubo de \varnothing 200 mm		m	260	22	5 720
Codos 90°	\varnothing 100 mm	----	170	1,15	195,5
	\varnothing 150 mm	----	194	1,72	333,68
	\varnothing 63 mm	----	36	0,414	5,04
	\varnothing 200 mm	----	25	2,3	57,5
Te	\varnothing 100 mm	----	321	1,15	369,15
	\varnothing 150 mm	----	51	1,72	87,72
	\varnothing 200 mm	----	5	2,3	11,5
Válvulas de Bola		----	72	49	3 528
Válvula Parker Brass Ball		----	20	107,61	2 152,2
Manómetros		----	6	427	2 562
Total					277 616,33

En total, el costo de la inversión asciende a 277 616.33 USD como se observa en la Tabla 3.7, lo que evidencia que esta tecnología tiene una buena viabilidad económica, además de que su implementación tiene un gran impacto ambiental y social.

3.5.3 Evaluación ambiental y energética

Cálculo de los costos por emisión de CO₂ y SO₂ a la atmosfera

El consumo medio de combustible en la destilería en los últimos cinco años comprendidos entre 2015-2019 es de 2523 toneladas aproximadamente. Aplicando las ecuaciones correspondientes se obtienen los valores de CO₂ y SO₂ expulsados a la atmósfera respectivamente.

Determinación del CO₂

$$MCO_2 = 1,866 \times \frac{c^t}{100} \times B \times \rho$$

$$MCO_2 = 7,9 \text{ t/año}$$

Este resultado proporciona la media de emisiones de CO₂ a la atmósfera es aproximadamente de 7,9 toneladas anuales.

Determinación del SO₂

$$MSO_2 = 20 \times S^t \times B \times (1 - fSO_2)$$

$$M SO_2 = 20 * 0.012 * 2523 * (1 - 0.02)$$

M SO₂ = 593,4 t/a

Se emiten aproximadamente 593,4 t/a de SO₂ al ambiente.

Mundialmente las empresas que expulsan gases a la atmósfera deben pagar x esto y de esta manera obliga a los directivos a crear nuevas tecnologías para disminuir las contaminaciones. La tabla 3.9 muestra los costos de expulsión de gases al medio ambiente.

Tabla. 3.9. Valores de costos de emisión de gases contaminantes. (Rodríguez, 2017)

Contaminantes	CO₂	SO₂
Costo de emisión (USD/t)	20,0	2021,6

Una vez analizado los valores de la tabla, se puede decir que la destilería “8 de marzo” ubicado en Urbano Noris tuviese que pagar por estas emisiones las siguientes cifras.

La tonelada de CO₂ cuesta a 20 USD por lo que la empresa asumiría un gasto por emisiones de CO₂ de 158 USD/año.

Tabla 3.10. Costos por concepto de emisiones de gases producidos por la destilería.

Gases emitidos	Costo USD/ton	Cant. de gases ton/año	Importe USD/año
CO₂	20	7,9	158
SO₂	2021,6	593,4	119 926 1,4
			119 941 9,4

La tonelada de SO₂ cuesta 2021,6 USD entonces la empresa llevará a gasto 119 926 1,4 USD/año.

Esto demuestra la suma importancia que tiene emplear nuevas tecnologías en las industrias ya que por concepto de emisiones de gases esta empresa gastaría un total de 1199419,4 USD/año. No obstante vendiendo estos créditos de carbono la empresa asume ese valor monetario como ganancia.

La imagen que a continuación se presenta muestra gráficamente las diferencias de costos para producir energía. La porción de color azul muestra el costo que genera la destilería para producir etanol anualmente antes de realizada la inversión que se propone. Aquí también se contemplan los gastos por emisiones de GEI al medio ambiente. Mientras que el color rojo muestra los gastos necesarios para producir el biogás una vez puesta en marcha la planta. El ahorro que existe entre lo que se gasta actualmente con respecto a lo que se debe gastar una vez hecha la inversión para producir energía es de 2115123,34 USD/año. Por lo que pudiera establecer que la factibilidad de la instalación de la planta de biogás está sustentada en los ahorros relativos que se tienen de los gastos productivos de energía.

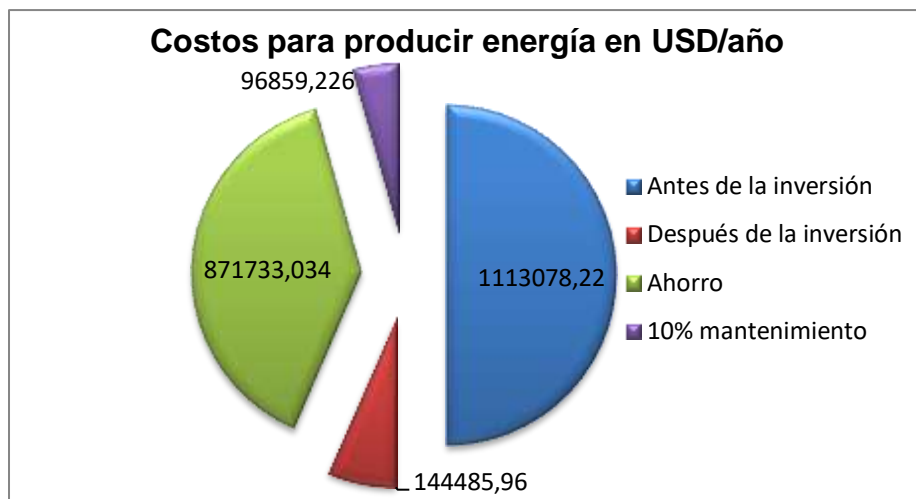


Fig. 3.21. Gráfica de consumos antes y después de la inversión para generar energía.

Cálculo abastecimiento de vapor y energía térmica:

El vapor es un elemento clave para la producción de alcoholes ya que estos son utilizados mayormente para la destilación–rectificación y fermentación y limpieza. La destilería necesita para estos procesos, un flujo de 363 kg/hl para el proceso de destilación – rectificación y 7.0 kg/hl para los procesos de fermentación y limpieza. Las presiones que se deben alcanzar para ser utilizado en destilación – rectificación es de 0,7 bares vapor de (saturado de baja presión) y una presión de 2 bares (Vapor vivo), para ser utilizado en pasteurización, limpieza y otros usos. [19]. Actualmente en las industrias azucareras en general, las calderas de vapores son de baja presiones (11,5 bares) y las temperaturas de los mismos oscila entre los 185,48°C, [20]. La tecnología a presentar es una unidad de CHP QUANTO denominada **ECOMAX 4BIO**. A continuación, se muestran en una tabla los valores productivos de la unidad generadora.

Tabla 3.11. Datos de la unidad de cogeneración.

ECOMAX 4BIO	
Potencia eléctrica P_e	5 300kW
Potencia térmica recuperable máx. $V_{m\acute{a}x}$	7995 kW
Rendimiento eléctrico η_{elec}	42,7%
Rendimiento térmico η_t	46,1%
Potencia introducida, Q	2000 kW
Consumo de combustible PCI	5 274 kW
Presión gas en la alimentación	50-200 mbar

Cantidad de vapor necesario para Destilación- rectificación

$$363 \frac{kg}{hl} \times 500 \frac{hl}{día} = 181500 \frac{kg}{día} = 181,5 \frac{t}{día}$$

Cantidad de vapor necesario para Fermentación- limpieza

$$7 \frac{kg}{hl} \times 500 \frac{hl}{día} = 3500 \frac{kg}{día} = 3,5 \frac{t}{día}$$

Los cálculos antes representados fueron tomados por el consumo de vapor de la destilería y la producción de hectolitros de etanol que se pretende hacer. Debido a esto se requiere un total de 185 t/día para cubrir la demanda que se requiere. La siguiente tabla muestra los valores de vapor del central que se requieren.

Tabla 3.12. Datos del vapor de la destilería

Parámetros	Destilación- rectificación	Fermentación- limpieza
Presión de vapor (bar)	0,7	2
Temperatura de vapor (°C)	185,48	185,48
Vapor consumido (t/d)	181,5	3,5

Traducido estos valores en combustibles generadores de vapores se obtienen los valores que a continuación se presenta mediante la utilización del fuel oil. En esta valoración se hace para un consumo promedio del combustible fósil anteriormente analizado y posteriormente se harán los cálculos pertinentes para sustituirlos por biogás. Para esto se toma un consumo anual de 2523089,4 kg de fuel oil considerando que el año es de 290 días.

Cálculo de la energía térmica procedente del fuel oil en la producción los vapores:

Cantidad de combustible anual 2 523 089,4 kg/año lo que equivale a 8 700 kg/día de consumo. Por lo que se establece que para producir 185 000 kg/día de vapor se necesitan 8 700 kg/día de fuel oil. Por tanto, se puede establecer la energía térmica procedente del combustible para producir el vapor necesario como:

$$E_c = CP \times Q$$

Dónde:

E_c : Energía del combustible (kW)

CP: Poder calórico del vapor. (kWh/ m³)

Q: Caudal del combustible (m³/s)

Para la demanda de 53650 t/año de vapor se consume la cantidad de fuel oil antes mencionada puesto que las energías térmicas son producidas por calderas a bajas presiones que funcionan con dicho combustible.

Para esto se debe calcular el consumo de combustible por segundo por el volumen específico del mismo

para obtener el caudal del combustible, por tanto

$$Q = f_c \times V_e$$

Dónde:

Q: caudal del combustible (kg/h)

Sustituyendo valores en la ecuación 15:

$$Q = 362,5 \frac{kg}{h}$$

Sustituyendo en la ecuación 14:

$$E_c = 11,08 \frac{kWh}{kg} \times 362,5 \frac{kg}{h} = 4016,5 kW$$

La energía térmica que genera el fuel oil es de 4016,5 kW.

Para el cálculo con respecto al biogás se tomará el mismo procedimiento anterior.

Datos:

$$CP_{\text{biogás}} = 6,65 \text{ kWh/m}^3$$

$$Q_{\text{biogás}} = 780 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$E_{\text{biogás}} = 6,68 \frac{kWh}{m^3} \times 780 \frac{m^3}{h} = 5210,4 kW$$

Al comparar los valores obtenidos la producción diaria de biogás cubre perfectamente la demanda térmica de la destilería y queda un excedente de energía térmica de 1193,5 kW que puede ser utilizado de diversas formas según la directiva de la empresa estime conveniente.

Conclusiones Parciales del capítulo III

En sentido general los resultados ofrecen evidencias sobre la viabilidad técnica y económica de la instalación, y las potencialidades para cubrir totalmente la demanda energética en la destilería anexa a la Empresa Azucarera Urbano Noris en la provincia de Holguín.

Se considera necesario resaltar:

1. La existencia de condiciones para la instalación de la planta diseñada en un área aledaña a la destilería, lo que minimiza las dificultades técnicas durante el montaje, operación y mantenimiento.
2. Los volúmenes de vinaza y cachaza procesados en la instalación diseñada producirán 28 213 m³/día de biogás (60 % de metano). Con ellos se generarán 67711 kWh/día de potencia eléctrica y 110 031 kWh/día de energía térmica. En ambos casos se superan las necesidades propias del proceso y significa un cambio en la matriz energética de la destilería.

3. El empleo del Biogás no solo aprovecha el valor de una fuente renovable de energía, sino que contribuye a disminuir la emisión de un gas de efecto invernadero (metano) 21 veces más perjudicial que el gas de comparación internacional (CO₂).
4. La generación eléctrica de la planta diseñada (67711 kWh/día) significa dejar de emitir 260 000 t/día de CO₂.
5. Para el periodo de trabajo típico de la destilería el tiempo de recuperación de inversión está en el orden de los tres años.
6. Los resultados que se resaltan evidencian la viabilidad técnica, económica, ambiental y energética de la planta diseñada.

CONCLUSIONES

1. Se elaboró una solución tecnológica que permite procesar volúmenes de residuales de vinaza y cachaza, la instalación diseñada producirá 28 213 m³/día de biogás (60 % de metano), con ellos se generarán 67 711 kWh/día de potencia eléctrica y 110 031 kWh/día de energía térmica lo que supera al 252 % las necesidades propias del proceso y permite elevar la eficiencia energética en la destilería “8 de marzo”.
2. En el estudio de los fundamentos teóricos y metodológicos existentes se comprobó que los residuos de la destilería y la empresa azucarera constituyen una fuente importante de energía que, a partir de la mezcla vinaza – cachaza se pueden obtener altos volúmenes de producción de biogás por digestión anaeróbica que favorecen la elevación de la eficiencia energética en el proceso fabril. También fue analizado el comportamiento del bagazo que a pesar de mejorar el rendimiento de obtención de biogás se desecha por los otros destinos dentro de la economía nacional.
3. Se realizó la propuesta del diseño de reactores anaeróbicos para la destilería “8 de marzo” como parte de una solución tecnológica, donde se obtuvo, el diseño de una planta de biogás que aprovecha los residuos de vinaza de la destilería “8 de marzo” y la cachaza de la empresa azucarera “Urbano Noris”.

Se consideran aportes al diseño de este tipo de plantas:

- La inclusión de una etapa para el pre-tratamiento de la Cachaza a partir del empleo simultáneo de tratamiento alcalino y térmico.
 - El establecimiento de una etapa de post-tratamiento para agotar los componentes contaminantes de los residuos e incrementar la producción específica de biogás.
4. Al evaluar la solución tecnológica en base a los criterios técnicos, socioeconómicos, ambientales y energéticos se determinó que el diseño de la planta propuesta es factible porque:
 - La generación eléctrica de la planta (67 711 kWh/día) significa dejar de emitir 260 000 t/día de CO₂, esto permitirá mitigar los efectos contaminantes de los residuales vinazas-cachaza a partir de su procesamiento como combustible alternativo y elevar la eficiencia energética de la producción de alcohol en la destilería “8 de marzo”.
 - Se obtienen residuos que se emplean como biofertilizantes en forma líquida y sólida para la fertilización de los suelos cañeros.
 - Permite eliminar la laguna de oxidación y con ello mitigar las afectaciones al medio ambiente y los impactos sobre las comunidades aledañas.

RECOMENDACIONES

1. Que se ejecute el proyecto.
2. Evaluar el desarrollo de propuestas para otras instalaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Abreu, Y. L. (2005). *La digestión anaerobia aspectos teóricos. Parte 1*. Habana: ICIDCA .
- Acosta, Y. L. (2014). *Alternativas de tratamiento de Vinazas de Destilerías*. La Habana.
- Acostal, I. d., & Quintana, O. (2018). Propuesta de metodología para elaborar la estrategia de gestión de la innovación tecnológica en las empresas cubanas. *SciELO Analytics*, 2-15.
- Alibaba.com. (10 de junio de 2020). *Catálogo oficial para equipos de plantas de biogás*. Obtenido de Alibaba.com: Catálogo Alibaba.com
- ALLENDES, J. L. (2015). Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: una estrategia para diferentes contextos. Santiago de Chile.
- Armas, J. R. (2017). Aplicación de la vinaza en la caña de azúcar. Villa Clara .
- Arzuaga, E. F. (2018). Estudio de factibilidad para el análisis de la sostenibilidad agroindustrial de la Empresa Azucarera de Holguín. Holguín.
- Báez, I. r. (2019). tarea de proyección tecnológica Destilería 8 de Marzo, EA Urbano Noris, Holguin. Holguín.
- Bello, K. F. (2016). *Caracterización de las aguas residuales de la industria azucarera*. Honduras.
- CERDÁ, E.; CAPARRÓS, A. y OVANDO, P. (2008): Bioenergía en la Unión Europea. *Ekonomiaz*, 67, 1.er cuatrimestre, pp. 156-181.
- Consejo de Estado. (11 de octubre de 2014). Decreto ley 327 del reglamento del proceso inversionista. Consultado el 10 de noviembre de 2019, de Gaceta Oficial de la República de Cuba: <http://www.gacetaoficial.cu> (2017). Decreto ley 327 del reglamento del proceso inversionista.
- Cuba, M. d. (2020). *Actualización de precios mayorista de combustibles*. La Habana.
- Cuba, m. d. (22 de junio de 2020). Costos de producción de energía en Cuba. Consultado el 22 de junio de 2020, de <http://www.minem.gob.cu/> energías renovables, sección_1635
- Chacón, J. A. (2016). *Tecnología del biogás manual de usuario*. Habana: cubasolar.

- Chernicharo, C. A. (2007). *Biological Wastewater Treatment Series*. Brasil.
- Cruzata, K. E. (2018). *Diseño de biodigestor casero para la producción de energía aprovechando los desechos de café*. Holguín.
- Demajagua, Grupo de Desarrollo Web. (9 de MARZO de 2020). *Periódico la Demajagua*. Obtenido de Diario Digital la Demajagua.
- Dodane, P. H., & Ronteltap, M. (2015). *Lechos de Secado sin Plantas*. Senegal.
- Dr. Ing. Guardado Chacón J.A., I. L. (2017). Generación y uso de la Tecnología del biogás. *XIII Forum de Ciencia y Técnica*.
- ENARSA. (2012). Instalacion de Centrales a Biogás. *Energía Argentina Sociedad Anónima*, 2-28.
- Energía limpia. (2020). *Plantas de Biogás en España*.
- Erdwin García-Alvarez, J. P.-Y.-S. (2015). Modelo c on a a lgoritmo g g enético. ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar, 52.
- FAO, & Varnero Moreno, M. T. (2011). Manual de Biogás. *MINENERGIA/ PNUD / FAO / GEF*, pags. 8-119.
- García, L. E. (2017). *Diseño de un biodigestor para una planta de biogás agroindustrial*. Santander: Univercidad de Cantabria.
- García, L. F. (2016). *Selección y dimensionado de un sistema de generación de biogás mediante digestión anaerobia de purines codigeridos con glicerina*. Cádiz: Unvercidad de Cádiz.
- González, L. M., Reyes, I. P., & Romero, O. R. (2017). Anaerobic Co-digestion of sugarcane press mud with vinasse on methane yield. *Sancti Spíritus*.
- González, R. B. (2018). Potencialidades de los desechos de la industria azucarera para la producción de energía. Holguín.
- González Rodríguez, Susel. (2017). Trabajo de Diploma. "Potencialidad de la vinaza de la Destilería". SANTIAGO DE CUBA.
- Guevara A. 1996. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. División de Salud y Ambiente. Oficina Regional de la Organización Panamericana de la Salud. Lima, Perú. 80.

- Hernán Quiroz Marchant, C. d. (6 de abril de 2020). *Curso de Formación especializada en biogás para profesionales*. Obtenido de Módulo cuatro Diseño de plantas medianas y grandes.: Website: www.biogasenergia.cl
- Hernández, I. H. (2015). Planta de residuales por método anaeribio. *Manual de Usuario*, 3-8.
- ICIDCA (2014). Cálculos técnicos en el diseño de una planta de biogás.Caso de estudio "Tratamiento de vinazas de destilerías en reactores UASB". ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar, 29-33.
- INSUMOS, I. T. (2017). Listado de precios de fertilizantes. Consultado el 15 de junio de 2020, de www.una.gob.ec.
- Lettinga, G.; Hulshoff, L. (1991). UASB Process designg for various types of wastewater. *Water Sci Technol*.
- Lettinga, G. (2020). *UASB-Process Design for Various Types of Wastewaters*. Great Britain.
- Limonta, D. E. (2019). Estudio de pre factibilidad para el uso de los residuos de la industris azucarera para la producción de energía. Holguín.
- Moreno, M. T. (2011). manual de biogás. Santiago de Chile.
- Muñoz, M. (2015). Potencial energético de la vinaza para su utilización como biocombustible.
- NC 27:2012. (2012). Límite Máximo Permisible Promedio para las descargas de aguas residuales según la clasificación del cuerpo receptor.
- NC-521:2007, (2007). Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización, 2007.
- NC-855:2011 (2011). Utilización de las aguas residuales de la industria azucarera y de derivados en el fertirriego de la caña de azúcar. Oficina Nacional de Normalización, 2011.
- OLADE. (2015). Consultado el 2 de junio del 2020, de organización Latinoamericana de Energía: <http://www.olade.org/noticias/disponible-el-informe-de-estadísticas-energéticas-2014/>
- Obaya, M. C. y col. (1989). Manual de aguas para riego. ICIDCA, 1989

- Pérez, E. P., Carvajal, Y. A., Suárez, E. G., Tellez, Y. C., & Leyva., R. F. (2010). Análisis del proceso de obtención del alcohol extrafino en una destilería. Villa Clara, Cuba.
- Periche. (2018). Manual de biogás. Cuba: Colibrí.
- Rey, L. (2019). Cuanto es un kilowatt hora en combustible. Recuperado el 3 de mayo de 2020, de [http:// www.trabajadores.cu /20191007/cuanto es un kilowatt hora en combustible/](http://www.trabajadores.cu/20191007/cuanto-es-un-kilowatt-hora-en-combustible/)
- Rodriguez, S. G. (2017). *Potencialidad de la destilería 8 de Marzo para la obtención de biogás*. Santiago de cuba: Univercidad de Oriente.
- Savón, D. R., Portuondo, M. E., Abreu, I. M., & Silva, L. R. (2015). Manual de la tecnología del biogás. *Biogás la Energía de los Desechos*, 5-74.
- Siles, F. A. (2012). Generación de energía eléctrica a partir de Producción de Biogás. México.
- Stone, R. (1993). Introduction to internal combustion engines. 3 ed. Estados Unidos de América. Department of Engineering Science; University of Oxford. 641 p.
- Valencia, L. A. (2016). Sistema Integral de Generación de Energía Eléctrica por medio de Biogás. *Tesis Para Obtener el Grado de Maestro en Ciencias en Desarrollo Sustentable*, 14\94.
- Valdés, E. (2005). Uso eficiente del agua y aprovechamiento económico de los residuales de la industria azucarera y sus derivados. Informe final de proyecto. ICIDCA. 2005.
- Wesley, J. and Barbosa, L. A. (2000). Vinhaca de cana de açúcar. Série Engenharia Agrícola, Vol. Guaíba: Agropecuária.
- Yero., M. B. (2006). Efecto de la adición de distintas concentraciones de cachaza en el suelo sobre la propagación de Cocos nucifera L. Bayamo, Granma.

ANEXOS

ANEXO 1

Factores que afectan al proceso de producción de biogás

a) Temperatura

Los procesos anaeróbicos dependen fuertemente de la temperatura, más que los sistemas aeróbicos, el mantenimiento de una temperatura óptima que permita el desarrollo de los microorganismos anaeróbicos favorece al proceso de tratamiento. Existen tres rangos de temperaturas óptimas:

- Psicofílico (5-15) °C
- Mesofílico (35-40) °C
- Termofílico (50-55) °C

El intervalo más recomendable es el mesofílico, porque a estas temperaturas las bacterias se encuentran más activas, a temperaturas mayores de 40 °C y menores de 50 °C, la producción de metano se inhibe (CONAGUA, 2017)

b) Potencial de Hidrógeno (pH)

Existen dos grupos de bacterias en término de pH, las llamadas acinogénicas y las metanogénicas. El pH óptimo para el primer grupo es entre 5,5- 6,5 y para el segundo grupo es 7,8-8,2. El pH de operación para grupos combinados se encuentra en un rango óptimo de 6,5-7,8. Un bajo pH reduce la actividad de metanógenos, causando la acumulación de ácidos volátiles y de H₂, y un pH alto que esté por encima de 8 provoca que se generen iones tóxicos para el proceso. Para ajustar el pH en el reactor puede emplearse cal, bicarbonato de sodio (NaHCO₃) o hidróxido de sodio (NaOH) [21].

c) Biodegradabilidad anaeróbica de la Materia Orgánica (DQO/DBO)

La biodegradabilidad anaeróbica se define como el porcentaje de DQO presente en una muestra orgánica que se puede transformar en metano bajo condiciones anaeróbicas y se representa por la relación DQO/DBO.

La biodegradabilidad anaeróbica de un residuo se establece comparando la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO), representan indirectamente el contenido de materia orgánica de un residuo a través del oxígeno necesario para oxidar químicamente o biológicamente la materia orgánica. Una relación de DQO/DBO cercana a 2 se considera una buena indicación de la biodegradabilidad anaeróbica de las aguas residuales, cuanto mayor sea esta relación menor será la biodegradabilidad [7].

d) Sólidos Totales y Volátiles

Los sólidos totales son todo el material contenido en el líquido, ya sea suspendido o disuelto. Este parámetro puede tener efectos negativos para los cuerpos receptores por su intervención en la vida acuática, y a nivel de industria pueden obstruir tuberías por la porción de aquellos sólidos no solubles, pueden generar problemas de bombeo por las tuberías de alimentación y son difíciles de agitar dentro del biodigestor [22]; [23].

Los sólidos volátiles son la porción de los sólidos que pueden entrar en combustión, es decir, la materia orgánica contenida en el agua en forma sólida [22]

e) Nutrientes

Las bacterias que llevan a cabo los procesos de eliminación de materia orgánica además de carbono requieren otros nutrientes con nitrógeno, fósforo y azufre en grandes cantidades que son los llamados macronutrientes, también necesitan de la presencia de los micronutrientes que son oligoelementos que se encuentran normalmente en las aguas residuales. La proporción de estos elementos deben de tener una relación C:P:S de (500-1000):5:3. Estas bacterias tienen una composición química que responde a la fórmula general $C_5H_7NO_2$ [7].

La necesidad de nutrientes en los procesos aeróbicos es mayor que en los procesos anaeróbicos, pero siguen siendo indispensables para que se desarrollen las células y crezca la biomasa. En la tabla 2 se presentan los principales nutrientes y cationes necesarios en los procesos biológicos anaeróbicos.

Tabla 1.3. Requerimientos de nutrientes en procesos biológicos anaeróbicos. Fuente: [7].

Tipo de Nutriente		mg/g DBO	Exceso mg/L	Adición
Macronutrientes	N	5 a 15	50	NH_3 , NH_4Cl , NH_4CO_3
	P	0,8-2,5	10	NaH_2PO_4
	S	1 a 3	5	$MgSO_4 \cdot 7 H_2O$
Micronutrientes	Fe	0,03	10	$FeCl_2 \cdot 4 H_2O$
	Co	0,003	0,02	$CoCl_2 \cdot 2 H_2O$
	Ni	0,004	0,02	$NiCl_2 \cdot 6 H_2O$
	Zn	0,02	0,02	$ZnCl_2$
	Cu	0,004	0,02	$CuCl_2 \cdot 4 H_2O$
	Mn	0,004	0,02	$MnCl_2 \cdot 4 H_2O$
	Mo	0,004	0,05	$NaMoO_4 \cdot 2 H_2O$
	Se	0,004	0,08	Na_2SeO_3
	T	0,004	0,02	$NaWO_4 \cdot 2 H_2O$
	B	0,004		H_3BO_3
Cationes	Na		100-200	$NaCl$, $NaHCO_3$
	K		200-400	KCl

	Ca		100-200	CaCl ₂ - 2 H ₂ O
	Mg		75-250	MgCl ₂

f) Relación C/N

El nitrógeno tiene una gran importancia para el crecimiento y actividad bacteriana. Las materias primas con una baja razón de carbono/nitrógeno (C/N) son fácilmente digeridas por la población de bacterias, pero algunos residuos agrícolas como la paja, ya sea de trigo, arroz o caña presentan una relación C/N mayor de entre (87:1-67:1), por lo que requieren un suministro de nitrógeno para una digestión eficiente. Por otra parte, las heces y orines de animales son ricos en nitrógeno. Para una producción óptima se recomienda que la razón C/N de los materiales combinados en el interior del biodigestor sea menor de 30:1.

g) Compuestos Tóxicos

Los compuestos tóxicos tienen una gran influencia en la comunidad biológica dentro del reactor, ya sea favoreciendo o no a los procesos. Entre estos se encuentran el Hidrógeno (H₂), Oxígeno (O₂), ácido sulfhídrico (H₂S), amoníaco, ácidos grasos volátiles entre otros.

En la Figura 1.12 se aprecia un gráfico donde se representa esta influencia, que depende de la concentración en que se encuentren los compuestos tóxicos. Inicialmente en una pequeña concentración, los compuestos tóxicos pueden servir de estimulación para el crecimiento de la cantidad y el desarrollo de los microorganismos. Pero a medida que se continúa aumentando la concentración, se llega a cierto valor máximo, donde la concentración de dichos compuestos es la ideal u óptima, se comienzan a provocar problemas de inhibición de las bacterias presentes en el interior del reactor. Por esto es necesario el control cuidadoso de este factor para la obtención de una buena eficiencia en los procesos de fermentación.

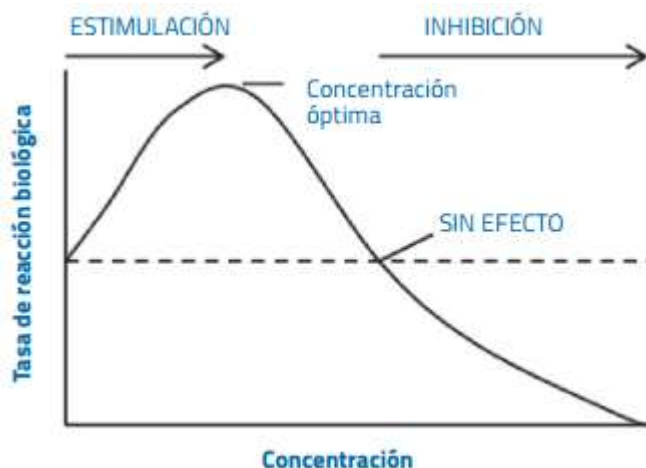


Figura 1.12. Efecto de la concentración de los compuestos tóxicos. Fuente: [7].

h) Ácidos Grasos Volátiles (AGV)

Este parámetro es una sustancia inhibidora presente en aguas residuales y en las vinazas, y es uno de los que se debe tener mayor control en la digestión anaeróbica debido a que es causante de la desestabilización y acidificación de los procesos anaeróbicos.

En un reactor estable, la concentración de AGV es inferior a 500 mg/L. Sin embargo, con un adecuado control del pH no se alcanza la inhibición hasta 5 000 mg/L, pero estas concentraciones tan altas no son recomendables [7].

ANEXO 2

Digestor dimensionamiento.

Variable	Unidad	Unidad												
Diámetro corona	m	15	15,5	16	16,5	17	17,5	18	18,5	19	19,5	20	20,5	21
Pendiente Talud	°	45º	45º	45º	45º	45º	45º	45º	45º	45º	45º	45º	45º	45º
Altura tronco de cono (prof)	m	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Altura libre	m	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Altura de llenado	m	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
Talud	m	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49
Radio corona	m	8	8	8	8	9	9	9	9	10	10	10	10	11
Perímetro corona	m	47	49	50	52	53	55	57	58	60	61	63	64	66
Radio nivel de llenado	m	7	8	8	8	8	9	9	9	9	9	10	10	10
Radio base	m	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	5
Volumen total	m³	438	482	528	576	627	680	735	793	853	915	980	1047	1117
Área base	m²	7	10	13	16	20	24	28	33	38	44	50	57	64
Área tronco de cono	m²	424	452	480	510	540	571	603	635	669	703	738	773	810
Área total	m²	431	461	493	526	559	595	631	668	707	747	788	830	873
Área gasómetro	m²	177	189	201	214	227	241	254	269	284	299	314	330	346
Altura gasómetro	m	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5
Radio esfera gasómetro	m	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12	13	13	13
Volumen máx gasómetro (casq esf)	m³	359	396	436	478	523	570	620	673	729	789	851	916	985
Variable	Unidad	Unidad												
Diámetro corona	m	21,5	22	22,5	23	23,5	24	24,5	25	25,5	26	26,5	27	
Pendiente Talud	°	45º	45º	45º	45º	45º	45º	45º	45º	45º	45º	45º	45º	45º

Altura tronco de cono (prof)	m	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Altura libre	m	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Altura de llenado	m	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
Talud	m	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49
Radio corona	m	11	11	11	12	12	12	12	13	13	13	13	14	14
Perímetro corona	m	68	69	71	72	74	75	77	79	80	82	83	85	85
Radio nivel de llenado	m	10	11	11	11	11	12	12	12	12	13	13	13	13
Radio base	m	5	5	5	6	6	6	6	7	7	7	7	8	8
Volumen total	m³	1189	1263	1339	1418	1500	1583	1669	1758	1848	1942	2037	2135	2135
Área base	m²	71	79	87	95	104	113	123	133	143	154	165	177	177
Área tronco de cono	m²	847	885	924	964	1004	1045	1087	1130	1174	1218	1263	1309	1309
Área total	m²	918	964	1011	1059	1108	1158	1210	1263	1317	1372	1428	1486	1486
Área gasómetro	m²	363	380	398	415	434	452	471	491	511	531	552	573	573
Altura gasómetro	m	5	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7
Radio esfera gasómetro	m	13	14	14	14	15	15	15	16	16	16	17	17	17
Volumen máx gasómetro (casq esf)	m³	1057	1132	1211	1294	1380	1470	1564	1662	1764	1869	1979	2093	2093

Anexo 3

Catálogo del Agitador AGS

Nº: Número de palas
 E: Diámetro de la hélice
 Tec: Serie técnica

Ham.: Sonda humedad
 AC: Anillo corriente
 Q: Caudal

• De serie
 - NO

Tipo	Carcasa motor	RPM	P2 (kw)	In (A)	Diámetro hélice (mm)	Nº palas	Empuje (N)	kg	Anillo corriente
AGS 170-2SHG/0,9	Hierro fundido	1380	0,42	3	176	3	120	20	-
AGS 180-3SHG/2 ML	Hierro fundido	1370	0,9	3,5	191	3	220	30	-
AGS 180-3SHG/2 DS	Hierro fundido	1370	0,9	3,5	191	3	220	30	-
AGS 190-3SHG/2,3	Hierro fundido	1350	1,4	4,9	197	3	275	40	-
AGS 300-3SHG/2,9	Hierro fundido	930	1,5	6	300	3	300	44	-
AGS 300-3SHG/3,6	Hierro fundido	950	1,9	8,5	300	3	320	57	-
AGS 370-3SHG/2,3	Hierro fundido	690	1,1	4	370	3	385	58	-
AGS 400-3SHG/3	Hierro fundido	670	1,7	8,7	400	3	420	114	-
AGS 400-3SHG/4,7	Hierro fundido	670	2,5	8,7	400	3	650	114	-
AGS 400-3SHG/6,1	Hierro fundido	710	3,4	14,5	400	3	780	140	-
AGS 600-3SHG/7,3	Hierro fundido	475	4	20	600	3	1040	240	-
AGS 600-3SHG/10	Hierro fundido	470	5,7	25	600	3	1500	240	-
AGS 600-3SHG/13	Hierro fundido	470	7,5	25	600	3	1850	240	-
AGS 190-3SHX/2,3	INOX AISI 316L	1350	1,4	4,9	197	3	275	46	-
AGS 300-2SHX/2,9	INOX AISI 316L	930	1,5	6	300	2	300	50	-
AGS 300-3SHX/3,6	INOX AISI 316L	950	1,9	8,5	300	3	320	65	-
AGS 370-3SHX/2,3	INOX AISI 316L	690	1,1	4	370	3	385	68	-
AGS 400-3SHX/3	INOX AISI 316L	670	1,7	8,7	400	3	420	114	-
AGS 400-3SHX/4,7	INOX AISI 316L	670	2,5	8,7	400	3	650	114	-
AGS 400-3SHX/6,1	INOX AISI 316L	710	3,4	14,5	400	3	780	140	-
AGS 600-3SHX/7,3	INOX AISI 316L	475	4	20	600	3	1040	245	-
AGS 600-3SHX/10	INOX AISI 316L	470	5,7	25	600	3	1500	245	-
AGS 600-3SHX/13	INOX AISI 316L	470	7,5	25	600	3	1850	245	-
AGS 180-3ACG/2 ML	Hierro fundido	1370	0,67	2,2	191	3	170	33	•
AGS 180-3ACG/2 DS	Hierro fundido	1370	0,67	2,2	191	3	170	33	•
AGS 190-3ACG/1,3	Hierro fundido	1350	1	2,6	190	3	220	43	•
AGS 300-3ACG/2	Hierro fundido	930	1	3,8	300	3	240	47	•
AGS 300-3ACG/2,4	Hierro fundido	950	1,3	4,2	300	3	280	60	•
AGS 370-3ACG/2	Hierro fundido	690	1	2,6	370	3	320	70	•
AGS 400-3ACG/2,6	Hierro fundido	670	1,4	4,8	400	3	360	120	•
AGS 400-3ACG/3,3	Hierro fundido	670	1,8	5,4	400	3	650	120	•
AGS 400-3ACG/4,7	Hierro fundido	710	2,6	6,6	400	3	680	145	•
AGS 600-3ACG/5,6	Hierro fundido	475	3,1	12,5	600	3	860	275	•
AGS 600-3ACG/7,1	Hierro fundido	470	4	13,7	600	3	1300	275	•
AGS 600-3ACG/8,9	Hierro fundido	470	6,1	15	600	3	1600	275	•
AGS 190-3ACX/1,3	INOX AISI 316L	1350	1	2,6	190	3	220	50	•
AGS 300-2ACX/2	INOX AISI 316L	930	1	3,8	300	2	240	55	•
AGS 300-2ACX/2,4	INOX AISI 316L	950	1,3	4,2	300	3	280	70	•
AGS 370-3ACX/2	INOX AISI 316L	710	1	2,6	370	3	320	79	•
AGS 400-3ACX/2,6	INOX AISI 316L	670	1,4	4,8	400	3	360	120	•
AGS 400-3ACX/3,3	INOX AISI 316L	670	1,8	5,4	400	3	660	120	•
AGS 400-3ACX/4,7	INOX AISI 316L	710	2,6	6,6	400	3	680	145	•
AGS 600-3ACX/5,6	INOX AISI 316L	475	3,1	12,5	600	3	860	280	•
AGS 600-3ACX/7,1	INOX AISI 316L	470	4	13,7	600	3	1300	280	•
AGS 600-3ACX/8,9	INOX AISI 316L	470	6,1	15	600	3	1600	280	•
AGS 600-3ACX/14	INOX AISI 316L	560	8,4	19,7	600	3	2275	280	•

ANEXO 4

Gasómetro esférico de membrana doble.



ANEXO 5

Tabla diámetros de PVC

Diámetro exterior		Longitud		Clase 5 75 PSI (5 bar)			Clase 7.5 105 PSI (7.5 bar)			Clase 10 150 PSI (10 bar)		
Nom	Real	Total	Útil	Esp.	Diam. Inter.	Peso	Esp.	Diam. Inter.	Peso	Esp.	Diam. Inter.	Peso
Pulg	mm	metros	metros	mm	mm	Kg/tubo	mm	mm	Kg/tubo	mm	mm	Kg/tubo
½	21	5.00	4.97	-	-	-	-	-	-	1.8	17.4	.840
¾	26.5	5.00	4.96	-	-	-	-	-	-	1.8	22.9	1.080
1	33	5.00	4.96	-	-	-	-	-	-	1.8	28.4	1.363
1 ¼	42	5.00	4.96	-	-	-	1.8	38.4	1.74	2.0	38	1.940
1 1/2	48	5.00	4.96	-	-	-	1.8	44.4	2.016	2.3	43.4	2.549

Definición de conducciones:

Para conducir el sustrato y el digestato se han seleccionado conducciones de PVC de alta densidad, las razones por las que se ha seleccionado este tipo de conducciones se enumeran a continuación:

1. Resistencia a la corrosión (excelente resistencia química).
2. Alta resistencia eléctrica.
3. Buena resistencia mecánica a golpes y presión.
4. Baja conductividad térmica frente a temperaturas extremas.
5. Buena hermeticidad de sus uniones.
6. Son flexibles, ligeras y de fácil instalación, además de ser baratas.
7. Presentan baja rugosidad (superficie interior lisa, mejor escurrimiento y bajas posibilidades de taponamiento).

Las dimensiones características de una tubería de polietileno son el diámetro nominal (coincide con el exterior) y su espesor nominal. La forma de expresar las características geométricas del tubo, es mediante el valor de la denominada SDR (Relación de Dimensiones Estándar), siendo:

$$SDR = \frac{D}{e} \dots \dots \dots (38)$$

Dónde:

D = diámetro exterior o nominal de la tubería, mm

e = espesor de pared mínimo, mm

Las líneas 1 y 2 están constituidas por tuberías en las que las velocidades se recomiendan que sean superiores a 1,6 (m/s), pero inferiores a 2,3 (m/s) para evitar desgaste por abrasión y gasto excesivo de potencia para mover el fluido, y se debe asegurar que el flujo de circulación a través de las conducciones corresponda a un flujo turbulento totalmente desarrollado, con el objetivo de evitar decantación de sólidos y la consecuente formación de costras. En concreto, en esta instalación, ambas líneas circularán por una tubería serie SDR de 100 mm de diámetro nominal. Las tuberías deben instalarse con una pendiente mínima del 0,5% para permitir que se vacíen por gravedad. Se debe prever la instalación de accesorios de limpieza en caso de obstrucción.

➤ La línea 1 será la encargada de transportar el sustrato desde los tanques de recepción y homogenización de la vinaza y del tanque de recepción de la cachaza hasta los reactores UASB, luego transportará ambos sustratos al tanque de distribución del digestato en el cual estará un periodo de tiempo determinado antes de pasar al postdigestor. La autora [14] asegura que una solución al problema de las obstrucciones es la instalación de una T con un tapón ciego en la bifurcación.

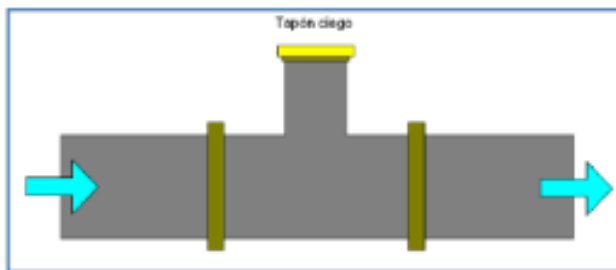


Figura 2:18 Esquema de una T en tubería. Fuente: [14]

➤ Línea 2: se encargará de Transportar el digestato hacia el tanque de almacenamiento (T-02), además transportará el lodo al lecho de lodos, y enviará digestato al I.C para disminuirle la temperatura a la vinaza caliente (90 °C) antes que entre al tanque de recepción T-01 para esta línea se han seleccionado tuberías PVC de igual forma por las características de este material.

Las tuberías se fabrican en dimensiones normalizadas por la “American Association for Proofs and Materials” (ASPM). En este caso se han dimensionado las conducciones para una velocidad de flujo recomendada para conducciones de agua de 1,9 m/s. Para ello se han seleccionado tuberías PVC con un DN de (100 mm).

➤ La línea 3 tendrá como finalidad transportar vapor a bajas presiones desde el módulo de cogeneración hasta la destilería y la empresa azucarera. De igual forma se han seleccionado tuberías PVC por las

características de este material. Las tuberías se fabrican en dimensiones normalizadas por la “American Association for Proofs and Materials” (ASPM).

En este caso se han dimensionado las conducciones para una velocidad de flujo recomendada para conducciones de vapor agua de 10m/s. Para ello se han seleccionado tuberías PVC con un DN de (150 mm).

➤ Línea 4 es la encargada de conducir el biogás entre los diferentes elementos de la línea se han seleccionado también conducciones de PVC de alta densidad ya que estas son resistentes al biogás en este caso no existirán problemas de deformación a que la temperatura máxima de trabajo es de 37°C.

La conducción ha sido dimensionada para una velocidad de flujo de 15m/s, que está dentro del intervalo recomendado para gases a baja presión ($10 < V_f < 20$ m/s). En concreto se han seleccionado tubos de PVC de alta densidad de DN 150 mm. La autora [14] plantea que la línea de conducción de gas debe ir preferiblemente enterrada o recubierta para evitar el deterioro (cristalización) por la luz solar.

De lo contrario, se colocará elevada para evitar daños físicos causados por personas o animales. Todas las tuberías de biogás deben pintarse de amarillo con una flecha que indique la dirección de flujo.

A continuación, se presenta una tabla resumen de las conducciones:

Tabla 2.19 Resumen de las conducciones de la planta

Línea	Fluido	Material	Caudal (m ³ /s)	DN (mm)	V (m/s)
Línea 1: Alimentación T-01	Sustrato (37°C)	PVC	37,5	100	1,9
Línea 2: Descarga del Digestato	Digestato (37°C)	PVC	6,25	100	1,9
Línea 3: vapor a bajas presiones	Vapor de Agua (37°C)	PVC	6,25	150	10
Línea 4: Biogás	Biogás (37°C)	PVC	176,3	200	15

ANEXO 6

Las válvulas empleadas en los sistemas de tuberías de plantas de biogás se detallan brevemente:

Válvulas de compuerta:

Se diseñan para abrir o cerrar completamente una conducción evitando con ello el paso del fluido. El órgano de cierre consiste en un disco perpendicular a la dirección del flujo, que se desplaza verticalmente sin girar. El disco tiene forma de cuña y se adapta a un asiento que presenta la misma forma. Se situará una válvula de compuerta en la línea 1 situada en la descarga del tanque de homogeneización (T-01) y otra en la línea 2 situada a la descarga del digestor (postdigestor).

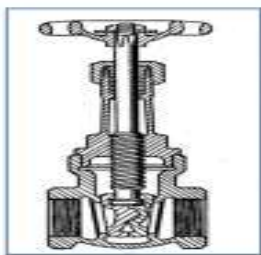


Fig.2.19 Válvula de compuerta. Fuente: [14]

Válvulas de bola:

El órgano de cierre es una bola con una perforación diametral de igual sección que la tubería. El movimiento completo de accionamiento de la válvula es de $\frac{1}{4}$ de vuelta, con el que pasan de estar totalmente abiertas a totalmente cerradas cuando la bola gira 90°

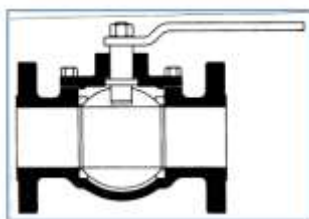


Fig.2.20 Válvula de bola.

Se instalarán 3 válvulas de bola en la línea de biogás, una al principio de la línea, en la descarga del gasómetro, otra en la alimentación del sistema de purificación del biogás y otra al final de la línea, en la alimentación del módulo CHP. Además, es necesaria otra válvula de bola situada en la línea de alimentación de la antorcha de seguridad que actuara como válvula de control en el sistema de control de presión del gasómetro.

Válvulas de retención:

Se diseñan para permitir que el fluido circule en un único sentido. Su apertura se produce debido a la presión del fluido que circula por las conducciones en un determinado sentido. Cuando el flujo se detiene se cierra de forma automática por acción de la gravedad o mediante un resorte en la parte móvil.

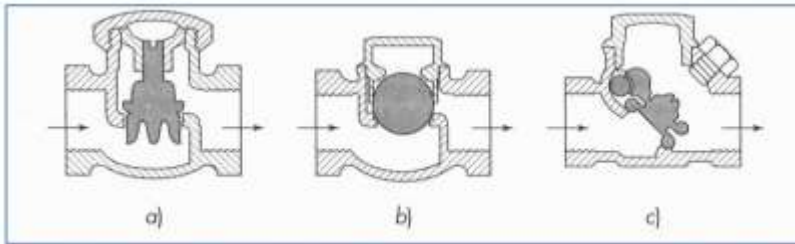


Fig. 2.21 Válvula de retención: a) de elevación, b) de bola, c) de bisagra. Fuente: [14]

En la planta se ha considerado la instalación de 4 válvulas de retención y su objetivo básicamente es el de proteger las bombas o equipos similares. Se situarán dos válvulas de retención en la línea 1:

- una situada en conexión con la válvula de compuerta situada a la salida del tanque de homogeneización (T-01), su función será proteger la bomba (B-01)
- otra situada a la salida del intercambiador de calor (IC) para el buen funcionamiento del mismo.

Se situará una válvula de retención en la línea 3, en la descarga de la bomba (B-02) que impulsará el agua al intercambiador de calor (IC) para enfriar la vinaza. Se instalará una válvula de retención en la línea 4, en la descarga del soplador de biogás (S-B).

Válvula de globo:

Se usan para cortar o regular el flujo del líquido y este último es su uso principal. Son especialmente indicadas para producir estrangulamiento debido a la resistencia que presenta ante el flujo. En ocasiones la caída de presión en los sistemas suele ser elevada por lo que para minimizar este hecho se emplean válvulas de globo Y en ángulo

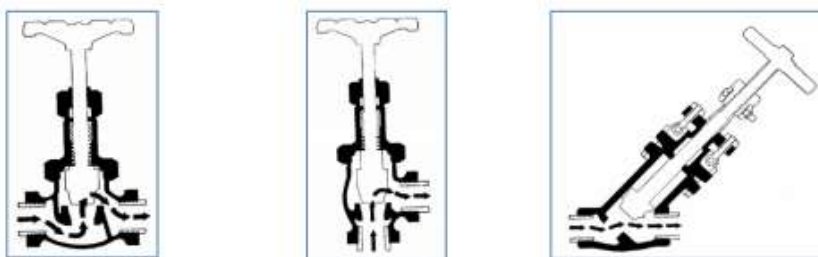


Fig. 2.22 Válvula de globo (estándar, en ángulo y en Y (de izq. a dcha.) Fuente: [14]

Se instalará una válvula de globo en la línea 3 que permitirá ajustar el flujo de agua al intercambiador de calor (IC).

Tabla 2.20 Cantidad de Válvulas por línea

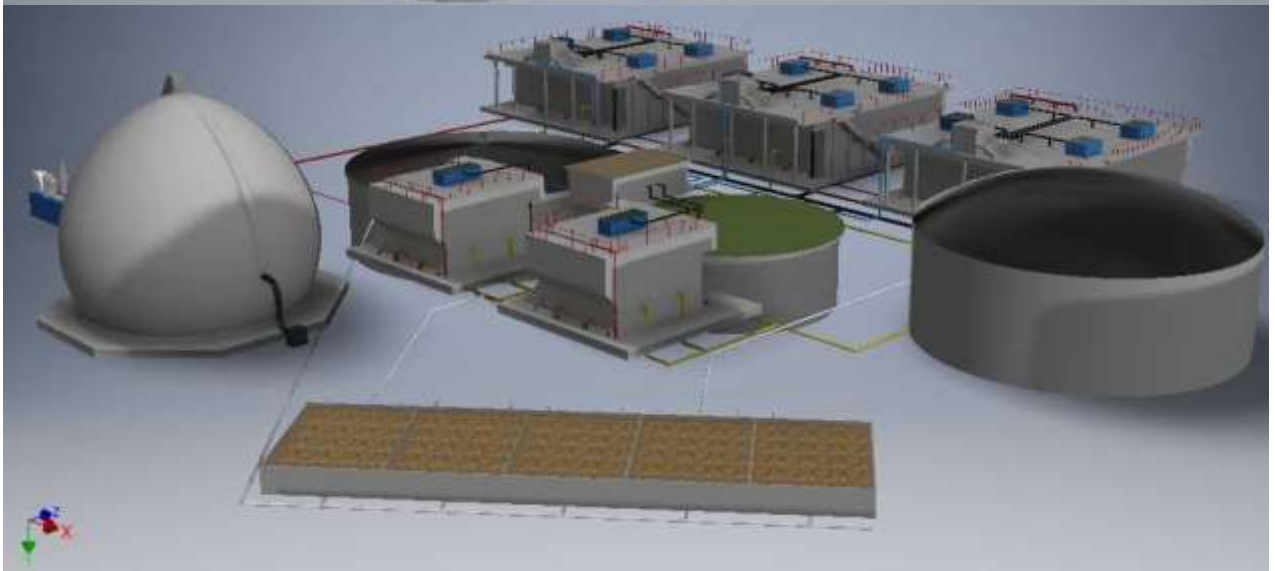
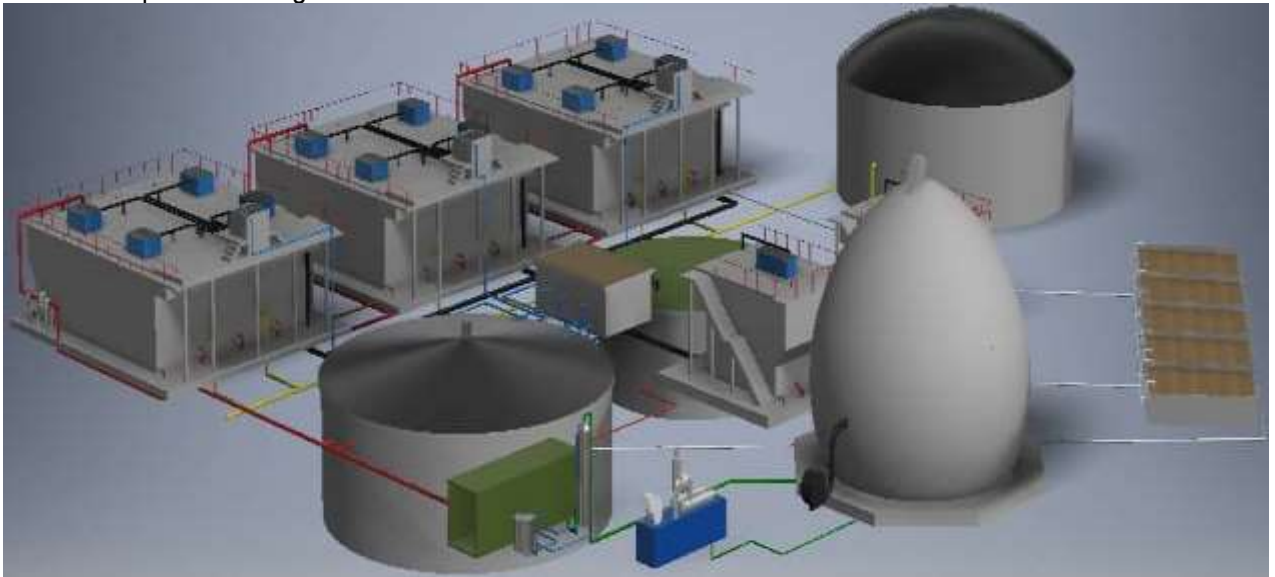
Cantidad de válvulas	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Línea 4
compuerta	1	1		
Bola				4
Globo			1	
Retención	2		1	1

Anexo 7

vistas de la planta de biogás.



Anexo 8
vistas de la planta de biogás.



Anexo 9.

Sedimentador instalado en la planta de estudio



Anexo 10.

Tecnologías para la cogeneración de energía




Anexo 11.

Catálogo de precios de fertilizantes

FERTILIZANTES				TABLA DE DESCUENTOS (ABRIL 2017)			
TIPO	PRODUCTO	PRESENTACIÓN	P.V.P.	PVP 1-20	PVP 21-100	PVP 101-499	PVP 500...
EDÁFICOS	DAP	SACO 50 KG	\$ 32.63	\$ 27.80	\$ 26.43	\$ 25.75	\$ 25.07
EDÁFICOS	MOP GRANEL™ (POLVO)	SACO 50 KG	\$ 21.47				
EDÁFICOS	MURIATO DE POTASIO BLANCO	SACO 50 KG	\$ 28.93	\$ 20.74	\$ 20.00	\$ 19.63	\$ 19.26
EDÁFICOS	MURIATO DE POTASIO ROJO	SACO 50 KG	\$ 28.93	\$ 20.74	\$ 20.00	\$ 19.63	\$ 19.26
EDÁFICOS	SULFATO DE AMONIO	SACO 50 KG	\$ 14.43	\$ 14.36	\$ 13.44	\$ 12.87	\$ 12.41
EDÁFICOS	SULFATO DE POTASIO	SACO 50 KG	\$ 42.00	\$ 37.77	\$ 36.28	\$ 35.09	\$ 33.31
EDÁFICOS	UREA GRANULAR	SACO 50 KG	\$ 25.83	\$ 19.07	\$ 18.56	\$ 17.72	\$ 17.38
EDÁFICOS	UREA PERLADA	SACO 50 KG	\$ 19.63	\$ 18.84	\$ 18.34	\$ 17.84	\$ 17.51
MEZCLAS	FERTIMIX 10-30-10	SACO 50 KG	\$ 30.00				
MEZCLAS	FERTIMIX 12-24-12 (CACAO)	SACO 50 KG	\$ 30.30				
MEZCLAS	FERTIMIX 15-15-15	SACO 50 KG	\$ 26.70				
MEZCLAS	FERTIMIX 15-4-23 (BANANO)	SACO 50 KG	\$ 25.52				
MEZCLAS	FERTIMIX 8-20-20 (SIN NÚCLEO)	SACO 50 KG	\$ 25.00				
MEZCLAS	FERTIMIX DUO (50/50) (N/K)	SACO 50 KG	\$ 26.23				
MEZCLAS	FERTIMIX DUO2 (70/30) (P/NÚCLEO)	SACO 50 KG	\$ 30.86				
ORGÁNICO	UNABONO	SACO 50 KG	\$ 7.00				

Anexo 12.

Catálogo de precios de fertilizantes

 LISTADO DE PRECIOS				
AGROQUÍMICOS				
TIPO	PRODUCTO	INGREDIENTE ACTIVO	PRESENTACIÓN	P.V.P.
CORDONANTE	PROPALSOR	OCTILFENILPOLIETILÉTERO + ALQUILSULFOSUCINATO + POLIALQUILHEPTANETRISSILOXANO	250 CC	\$ 3.80
FERTILIZANTE FOLAR	CALDO + BORO	CALDO Y BORO	1 LITRO	\$ 11.80
FERTILIZANTE FOLAR	ZNC	ZNC	1 LITRO	\$ 7.50
FUNGICIDA	BUMPER	PROPICONAZOLE	1 LITRO	\$ 17.80
FUNGICIDA	ORONAX	TERBUCONAZOLE	1 LITRO	\$ 22.80
FUNGICIDA	SILANOUR	TERBUCONAZOLE Y TRIFLOROMENOL	750 CC	\$ 22.50
FUNGICIDA	TEGA	TRIFLUOROSTROBIL	150 CC	\$ 17.54
HERBICIDA	AMINA	AMINA	1 LITRO	\$ 5.75
HERBICIDA	BISPIRIDAC	BISPIRIDAC SODIUM	100 ML	\$ 15.84
HERBICIDA	BUTHACLOR	BUTHACLOR	1 LITRO	\$ 8.80
HERBICIDA	GLIFOSATO	GLIFOSATO	1 LITRO	\$ 8.79
HERBICIDA	GRANVIA	BISPIRIDAC SODIUM	100 CC	\$ 14.80
HERBICIDA	METSULFURÓN	METSULFURÓN METHYL	15 G	\$ 5.80
HERBICIDA	PENDIMETALIN	PENDIMETHALIN	1 LITRO	\$ 16.76
INSECTICIDA	ACTUP	THIAMETHOXAM	100 GR	\$ 19.80
INSECTICIDA	CLORPRIFOS	CLORPRIFOS	1 LITRO	\$ 12.82
INSECTICIDA	IMIDACLOPRID	IMIDACLOPRID	100 ML	\$ 9.80
INSECTICIDA	INICTO	ACERFATE E IMIDACLOPRID	250 GR	\$ 19.80
INSECTICIDA	LAMBDAHALOTRINA	LAMBDAHALOTRINA	1 LITRO	\$ 11.50
INSECTICIDA	METALLA	DFLUBENZURON Y LAMBDAHALOTRINA	150 GR	\$ 11.50
INSECTICIDA	MOXSULFURÓN	MOXSULFURÓN	16 G	\$ 7.50
INSECTICIDA	THIOCARB	THIOCARB	100 CC	\$ 4.15
INSECTICIDA	THIOCARB	THIOCARB	250 CC	\$ 16.40
MOLUSCICIDA	METALDEHIDO	METALDEHIDO	500 GR	\$ 4.75

Anexo 13.

Listado de precios de combustibles en Cuba

Nombre	UM	Precio Empresa	Precio Industria
Gas Licuado (Granel)	L	0,2476	0,3294
Gas Licuado Regular (Envasado)	kg	0,4578	1,0050
Nafta de exportación	L	0,1809	0,2498
Nafta Solvente Reductor Visc.	L	0,2309	0,2998
Solvente Nafta Especial Grado A	L	0,2291	0,2980
Solvente Nafta Especial Grado B	L	0,2357	0,3046
Disolvente RL 95	L	0,2404	0,3093
Sustituto de Aguarras	L	0,2273	0,2962
Nafta Creada Pesada	L	0,2277	0,3466
Gasolina de motor (N.E 83 octano)	L	0,2710	0,3399
Gasolina de motor (N.E 90 octano)	L	0,2985	0,3674
Gasolina de motor (N.E 94 octano)	L	0,3158	0,3847
Keroseno grado A	L	0,3766	0,4455
Keroseno grado B	L	0,3471	0,4160
Diésel Regular	L	0,3398	0,4087
Aceite de Recirculación Ligero	L	0,3381	0,4070
Diésel Especial	L	0,3501	0,4190
Petróleo combustible ligero	HL	25,9076	32,7976
Petróleo combustible mediano BV	HL	22,2371	29,1271