



Universidad de Cienfuegos

Facultad de Ingeniería.

Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA).

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE
MÁSTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA**

**Título: Algoritmo para el diseño cuasi-óptimo de
alternativas de generación de biogás a partir de la
cachaza con fines de cocción**

Autor: Ing. Erdwin García Álvarez

Tutores: Dr.C. José P. Monteagudo Yanes.

Dr.C. Julio R. Gómez Sarduy.

Cienfuegos, 2016

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

El presente trabajo está relacionado con el diseño óptimo de una planta de biogás que utiliza cachaza como sustrato. El tipo de biodigestores a considerar es el de cúpula fija por las ventajas que ofrecen para instalaciones de pequeña escala.

El objetivo es encontrar las dimensiones y el número de biodigestores que satisfaga con máxima rentabilidad la demanda de cocción en una comunidad aledaña a un central azucarero.

En este trabajo se presenta el desarrollo teórico de los modelos empleados para el cálculo de los biodigestores y se emplea como método de optimización un algoritmo genético simple.

Para el análisis de rentabilidad de la propuesta se tiene en cuenta la venta o no de los lodos resultantes para su empleo como bioabono. El procedimiento propuesto constituye una herramienta importante para el análisis técnico y económico del diseño preliminar de plantas de biogás con fines de cocción en comunidades rurales. También se proponen indicadores de sostenibilidad energética que pueden ser aplicados a otros tipos de instalaciones similares en el caso de Cuba. Los resultados obtenidos están referidos a la UEB Central Azucarero “Ciudad Caracas”, ubicada en el municipio Santa Isabel de las Lajas, provincia de Cienfuegos, tomada como caso de estudio en esta investigación.

Contenido

Introducción	7
Capítulo 1. Estado del Arte sobre las tecnologías de generación y uso de biogás.	12
1.1 Generalidades.....	12
1.2 Desarrollo y Evolución de la producción de biogás a partir de Biomasa	14
1.3 Situación en Cuba	20
1.4 Producción de biogás a partir de la cachaza de caña de azúcar.	25
1.4.1 Factores que pueden afectar el proceso de digestión anaeróbica de la cachaza en la producción de biogás.	27
1.5 - Utilización del biogás.....	30
1.5.1 Aplicaciones del biogás obtenido de la biomasa.....	32
1.6 Ventajas del uso del biogás:	33
1.7. Conclusiones parciales	35
Capítulo 2. Modelación para el cálculo y optimización de una planta de generación de biogás.	36
2.1 Consideraciones utilizadas para el modelo.....	36
2.2 Método de cálculo.....	37
2.2.1 Determinación del volumen de biogás necesario	37
2.2.2 Dimensionamiento de un biodigestor de cúpula fija.	38
2.3 Cálculo del costo de la inversión	40
2.4 Flujos de caja anuales.....	42
2.5 Evolución artificial con algoritmos genéticos (AG).....	44
2.6 Aplicación del AG a la optimización del diseño de biodigestores.	46
2.6.1 Población inicial para el AG.	46
2.6.2 Función de adaptación del AG.....	47
2.6.3 Opciones utilizadas en el AG.	47
2.7 Conclusiones Parciales	49
Capítulo 3. Análisis de resultados.....	51
3.1 Caso de estudio.	51
3.2 Disposición actual de la cachaza.	53
3.3 Información básica para el diseño.....	54
3.4 Influencia de la venta de bioabono.	55
3.4.1 Biogás como única producción.....	56
3.4.2 Considerando el bioabono como un subproducto.....	57
3.5 Análisis de sensibilidad	59

3.6 Análisis de sostenibilidad	61
3.6.1 Indicadores de dimensión económica.....	62
3.6.2 Indicadores de dimensión social	63
3.6.3 Indicadores de dimensión ambiental.....	65
3.6.4 Sostenibilidad energética	67
3.7 Conclusiones parciales.	70
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES	72
Bibliografía.....	73

Introducción

El agotamiento progresivo de las reservas de combustibles fósiles y la acelerada contaminación del medio ambiente, hacen que un cambio de la matriz energética con mayor participación de las fuentes renovables de energía sea un asunto de primera prioridad. Por otro lado, la búsqueda de soluciones que contribuyan al desarrollo sostenible también apunta en esa dirección.

En Cuba, este tema cobra mayor significado por lo limitado de los recursos energéticos disponibles y los altos precios del combustible. Por estas razones, se llevan a cabo numerosos programas y proyectos, así como un control riguroso, tanto en el sector residencial como empresarial, del uso de los portadores energéticos. Una de las variantes más consideradas es el empleo del biogás para la generación directamente de energía térmica para diferentes usos o para la generación de electricidad.

El biogás puede generarse a partir de diferentes sustratos. En la literatura consultada, la mayoría de los reportes acerca de producción de biogás se basan en el empleo de residuos orgánicos provenientes de la actividad agropecuaria (Filippín, Follario, & Vigil, 2012) (Botero & Preston, 1987). Otra posibilidad es el empleo de residuos biodegradables procedentes de instalaciones industriales sometidos a digestión anaerobia. Una alternativa estudiada en Cuba es la producción de biogás y biofertilizante a partir de la cachaza lo que constituye además una alternativa de diversificación de la industria azucarera nacional (Torres, Villa, Montalvo, & Escobedo, 2012).

Lugones realiza un análisis de los biodigestores existentes en Cuba y las materias orgánicas utilizadas para la producción de biogás mencionando entre ellas la cachaza proveniente de la producción azucarera, pero se limita a dar información general sin

elementos que permitan elaborar una metodología para su empleo en la industria azucarera (Lugones, 2012).

Otros autores (Zamora, Cisneros, Macías, & López, 2012) realizan un estudio bibliográfico sobre la situación de las energías renovables en el mundo y en Cuba, haciendo énfasis en algunos aspectos relacionados con el biogás y ofrecen una metodología para calcular una planta de biogás que puede ser utilizada en comunidades de poca densidad poblacional para la cocción de alimentos, pero no consideran el empleo de la cachaza sino de residuos de cosecha y estiércol.

Un trabajo que destaca las potencialidades de la cachaza para la producción de biogás se reporta en (Hermida & López, 2006). Estos autores afirman haber obtenido índices de generación de gas metano con cachaza de 120 m³/t Otros investigadores refieren índices en un rango de 73,7 a 129,5 ml/g (Fonte & Tabla, 1999).

A pesar de que el tema ha sido ampliamente abordado para el escenario internacional y de la industria azucarera cubana, no se reporta ninguna evaluación de alternativas para inversiones de sistemas de este tipo empleando criterios para su optimización económica ni se reporta un análisis de sostenibilidad energética de esta tecnología para las condiciones de Cuba. De aquí se identifica el **problema científico** siguiente:

En Cuba existen potencialidades de generación de biogás a partir de la cachaza de los centrales azucareros en operación, y no existe un método que permita el diseño óptimo de una planta destinada a satisfacer las necesidades de cocción de la comunidad cercana a la fábrica.

Objetivo general:

Desarrollar un procedimiento basado en el método de cálculo de biodigestores de cúpula fija y empleando un algoritmo genético simple (AG) como algoritmo de optimización, que permita determinar las dimensiones y el número de biodigestores

necesarios para satisfacer las necesidades energéticas de cocción en una comunidad situada en las inmediaciones de un central azucarero empleando como sustrato la cachaza y maximizando la rentabilidad de la inversión.

Objetivos específicos:

1. Analizar el estado del arte de todos los aspectos relacionados con el diseño de instalaciones de biogás de pequeño tamaño.
2. Obtener un modelo matemático que, a partir del método de cálculo de biodigestores de cúpula fija, pueda ser aplicado para el diseño óptimo de este tipo de instalaciones.
3. Aplicar el procedimiento a un caso de estudio y hacer análisis de sensibilidad ante variaciones de las condiciones económicas para las cuales se realizó el cálculo.
4. Proponer indicadores de sostenibilidad energética del proyecto con biogás para comparar su sostenibilidad con relación al escenario actual.

Partes de este trabajo han sido presentados y discutidos en los eventos científicos siguientes:

- ***XIII Congreso Internacional sobre Azúcar y Derivados de la Caña. DIVERSIFICACIÓN 2015. Octubre 5-9/2015. La Habana.*** Modelo con AG para el diseño óptimo de una planta de producción de biogás a partir de la cachaza. Erdwin García, José Monteagudo y Julio R. Gómez.
- ***Taller Nacional de Medio Ambiente. Ambiental 2015.*** Empleo de algoritmo genético para la optimización del diseño de una planta de producción de biogás a partir de la cachaza. Erdwin García, José Monteagudo y Julio R. Gómez.

También partes del trabajo se han publicado en:

- Modelo con algoritmo genético para el diseño óptimo de una planta de producción de biogás a partir de cachaza. Erdwin García Álvarez, José Pedro Monteagudo Yanes, Julio Rafael Gómez Sarduy. Revista ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar, 49 (3) sept. - dic. 2015, pp.51-54.

Estructura de la tesis

La tesis está organizada en tres capítulos, cuyo contenido se sintetiza a continuación.

CAPÍTULO 1. Estado del Arte sobre las tecnologías de generación y uso de biogás

Se realiza un análisis bibliográfico, sobre los principales aspectos relacionados con la generación y uso del biogás a partir de diferentes sustratos y las potencialidades en Cuba.

CAPÍTULO 2. Modelación para el cálculo y optimización de una planta de generación de biogás

Se describe detalladamente el modelo desarrollado. Se parte del método de cálculo de biodigestores de cúpula fija y se determinan las necesidades de cocción de parte de una comunidad para utilizarla como función objetivo junto al valor presente neto de la inversión. Se describe, además, el principio de funcionamiento del algoritmo genético, así como la metodología y los pasos empleados para la implementación del procedimiento propuesto.

CAPÍTULO 3. Análisis de resultados

El procedimiento se aplica empleando como caso de estudio la UEB Central Azucarero Ciudad Caracas. Se hace un análisis de sensibilidad para ver el comportamiento de la rentabilidad de la inversión ante variaciones de datos económicos y se verifica que la

propuesta de cocción con biogás es superior al escenario actual en cuanto a sostenibilidad energética.

Capítulo 1. Estado del Arte sobre las tecnologías de generación y uso de biogás.

La producción de biogás es una alternativa energética renovable que se está utilizando ampliamente en el mundo. En la literatura consultada, la mayoría de los reportes acerca de producción de biogás se basan en el empleo de residuos orgánicos provenientes de la actividad agropecuaria (Filippín, Follario, & Vigil, 2012) (Botero & Preston, 1987).

Otra posibilidad es el uso de residuos biodegradables procedentes de instalaciones industriales sometidos a digestión anaerobia.

El objetivo de este capítulo es presentar un análisis del estado del arte relacionado con la producción de biogás y su uso, así como las metodologías de cálculo existentes reportadas en la literatura.

1.1 Generalidades

El biogás es el gas que se produce mediante un proceso metabólico de descomposición de la materia orgánica sin la presencia del oxígeno del aire. Este biogás es combustible, tiene un alto valor calórico del orden de 4 700 a 5 500 kcal/m³.

Su descubrimiento se remonta exactamente al siglo XVII, en 1667 cuando se identificó el gas metano (CH₄) por SHILEY, llamándosele “Gas de los pantanos” (Barrera, 2007), Aunque en el siglo X a.c. en Asiria y en el siglo XVI d.c. en la zona de Persia, se utilizaba el biogás para el calentamiento del agua de aseo personal.

En el siglo XVII Jan Baptista Van Helmont determinó, que de la materia orgánica en descomposición emanan gases inflamables. Alejandro Volta concluyó en 1776 que había una correlación directa entre la cantidad de material orgánico en descomposición, y la cantidad de gas inflamable producido durante la digestión anaeróbica del estiércol del ganado.

En 1806, en Inglaterra, Humphrey Davy, identificó un combustible gaseoso, rico en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), como resultado de fermentación de desechos animales en un ambiente húmedo. A partir de entonces se toma este acontecimiento como el inicio de las investigaciones en biogás (Barrera, 2007).

La primera unidad de digestión anaeróbica para el tratamiento de residuales fue construida en la India, en 1859 (Sánchez, 2005).

En el transcurso de las dos conflagraciones mundiales hubo interés por el biogás, en Francia y Alemania se construyeron grandes fábricas productoras de biogás que se emplearon para abastecer de energía gaseosa a tractores y vehículos (Barrera, 2007).

La crisis energética de 1973 hizo renacer las motivaciones por el biogás como alternativa energética, aunque decayó después debido a la pérdida de confianza en la tecnología producto de fallas de diferente naturaleza en los sistemas para su captación y utilización (Barrera, 2007).

Este gas puede ser utilizado en la cocción de alimentos, para la iluminación de naves, viviendas, criaderos de animales que necesitan calefacción inicial, así como para la alimentación de motores de combustión interna que accionan, máquinas herramientas, molinos de granos, generadores eléctricos, bombas de agua, vehículos agrícolas, vehículos de transporte de pasajeros, vehículos de carga o de cualquier otro tipo. La generación natural de biogás es una parte importante del ciclo biogeoquímico del carbono. El metano producido por bacterias es el último eslabón en una cadena de microorganismos que degradan material orgánico y devuelven los productos de la descomposición al medio ambiente (Zamora, Cisneros, Macías, & López, 2012).

La composición química del biogás es la siguiente:

1. Metano (CH_4) = 55 a 70 %.
2. Anhídrido carbónico (CO_2) = 35 a 40 %.

3. Nitrógeno (N_2) = 0.5 a 5 %.
4. Sulfuro de hidrógeno (SH_2) = 0.1 %.
5. Hidrógeno (H_2) = 1 a 3 %.
6. Vapor de agua= Trazas.

Como se observa el aporte calórico fundamental lo ofrece el metano cuyo peso específico es de alrededor de 1 kg/m³. Si deseamos mejorar el valor calórico del biogás debemos limpiarlo de CO₂. De esta forma se logra obtener metano al 95 %. El valor calórico del metano puede llegar hasta 8 260 kcal / m³ con una combustión limpia (sin humo) y casi no contamina (Zamora, Cisneros, Macías, & López, 2012).

1.2 Desarrollo y Evolución de la producción de biogás a partir de Biomasa

En la actualidad, en un futuro no tan cercano, más del 85 % de las necesidades energéticas de nuestro mundo son y serán satisfechas con la utilización de combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón) únicos, no renovables, potencialmente contaminantes y utilizados de forma ineficiente, por el interés predominante de la producción de energía sobre el de su secuela ecológica sobre el planeta nuestro (Zamora, Cisneros, Macías, & López, 2012).

En el mundo actual y desde hace algunas décadas están presentes varias interrogantes: ¿Cuánto tiempo nos queda con el aprovechamiento de los combustibles fósiles?, ¿Cuánto daño causa su uso y explotación al medio ambiente?, ¿Estará el hombre preparado para los cambios necesarios en los estilos de vida y los sacrificios urgentes para evitar la destrucción del planeta?, ¿Podrá el hombre desarrollar las energías renovables con la calidad, cantidad y a la velocidad que necesita la humanidad en la actualidad?.

Como ya es conocido, la utilización de las energías renovables no es un hecho novedoso, fueron estas las primeras apeladas por el hombre; sin embargo, la aparición

de los combustibles fósiles las confinó por muchos años al abandono. En estos momentos la perspectiva ha cambiado, por una parte los problemas medioambientales debidos en un significativo porcentaje a los procesos de transformación energética y en su totalidad a la acción indiscriminada del hombre sobre la biosfera y por otra parte la convulsa realidad del mundo del petróleo (energético esencial en la actualidad) que ha enfrentado varias crisis en menos de 5 décadas que han puesto de nuevo sobre la alfombra las aisladas energías renovables; y aunque es cierto que todavía enfrentan contrarios cada día conquistan más partidarios, aumentando su importancia y su necesidad (Zamora, Cisneros, Macías, & López, 2012).

El uso de energías renovables en el mundo aún tiene poco peso en la matriz energética. En la figura 1.1 se puede apreciar que su participación ha ido incrementando, pero aún es insuficiente predominando un modelo de generación basado en combustibles fósiles.

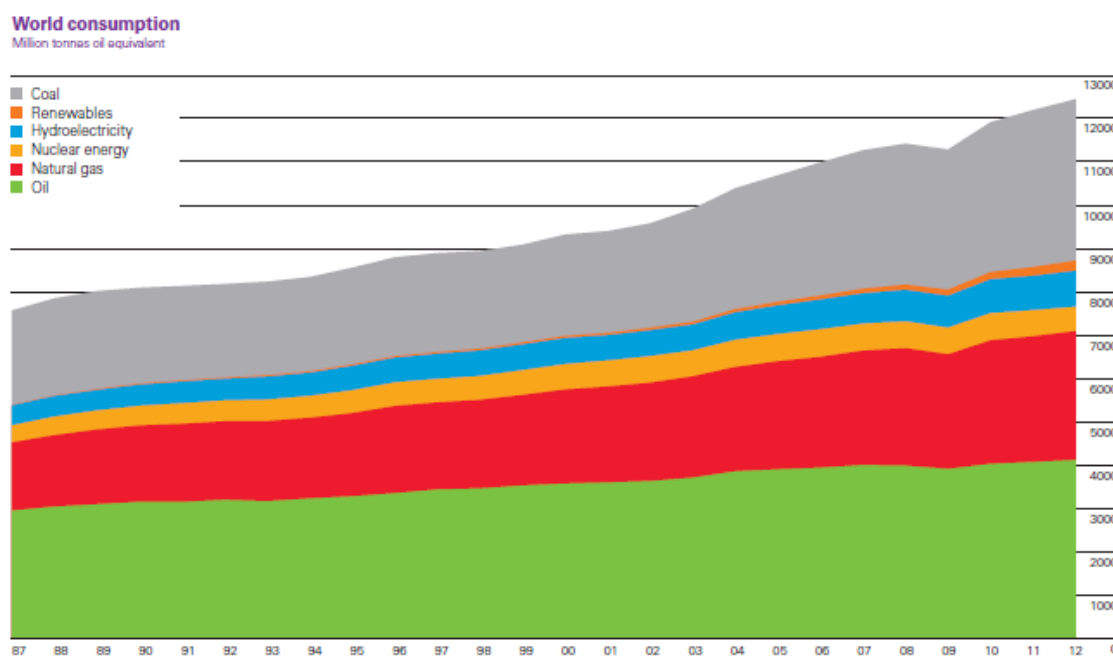


Figura 1.1 Perfil de consumo de energía a nivel mundial por tipo de fuentes desde 1987 hasta el 2012. (BP, 2013)

Entre las energías renovables se encuentra la biomasa. Esta es un recurso cuya utilización presenta características singulares y beneficios notables. Se trata de una fuente prácticamente, inagotable, producida cíclica y consecutivamente por el reino vegetal, animal y el sistema urbano e industrial, además existe por lo menos en alguna de sus formas en todas las zonas geográficas de este planeta.

La utilización de la biomasa tributa beneficios que no son sólo energéticos, su transformación es beneficiosa y necesaria para el medio ambiente. Además, es un sistema idóneo de eliminación de residuos. Se genera un gran número de residuos que contienen materia orgánica, que puede ser tratada mediante digestión anaeróbica para la producción de biogás, dentro de estas tenemos: la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), los fangos de estaciones de depuradoras de aguas residuales urbanas, las aguas residuales urbanas e industriales, los residuos industriales orgánicos y los residuos agrícolas y ganaderos.

Una de las formas de aprovechar la biomasa y residuos orgánicos con fines energéticos es para la producción de biogás mediante sistemas de inmediata y segura aplicación. Como fuente de energía renovable, el biogás es una fuente inagotable, limpia y que se puede utilizar de forma autogestionada. En este sentido, es una de las energías renovables más asequibles, dada la facilidad de su obtención. Asimismo, su uso genera una menor contaminación ambiental y constituye una alternativa viable al agotamiento de energías fósiles, como el gas natural y el petróleo.

La digestión anaeróbica para la generación de biogás se puede emplear en el tratamiento de los residuos biodegradables generados en determinadas industrias como la azucarera, alcoholera, cervecera, conservera, de derivados lácteos, oleícola, alimentaria y papelera. Los residuos agrícolas y ganaderos, también se pueden utilizar para la generación de biogás.

Las investigaciones tecnológicas han permitido desarrollar nuevos sistemas de digestión anaeróbica diferentes en función del tipo de residuo a tratar, que pueden clasificarse por un lado en sistemas de tratamiento para la FORSU, los lodos de depuradora y los residuos ganaderos y, por otro, en sistemas para el tratamiento de aguas residuales. Por tanto, el sector del biogás forma parte integrante de la industria de tratamiento de residuos orgánicos.

Cercano al año 1859 se construyó la primera instalación para producir biogás basado en el aprovechamiento de la descomposición de la biomasa en la India; a partir de ese momento se ha desarrollado el número de biodigestores, y actualmente trabajan en ese país miles de unidades. Muchas familias utilizaron plantas de biogás para producir energía como sustituto del combustible doméstico. Hoy existen plantas demostrativas multifamiliares donde el gas se hace llegar por tuberías a cada vivienda sobre la base de un precio módico por consumidor.

La República Popular China es una de las regiones que ha prestado mayor interés a este tipo de instalaciones, aproximadamente 6,7 millones de biodigestores en el 2005 (Sánchez, 2005). La situación en las zonas rurales de China ha estado caracterizada por una grave escasez de energía donde alrededor de 130 millones de familias carecen de combustible para uso doméstico durante tres meses del año. El 70 % del combustible para uso doméstico proviene de paja y tallos de cultivos. El estado solo puede solucionar el 13 % de las necesidades energéticas individuales para el sector rural (Zamora, Cisneros, Macías, & López, 2012).

En Europa existen varias instalaciones productoras de gas biológico, con una gran cantidad de instalaciones en sistemas industriales y agrícolas. Al igual que en otras regiones, al inicio el desarrollo del biogás fue más fuerte en la zona rural. Actualmente muchas instalaciones para el tratamiento de desechos municipales utilizadas como

productoras de energía y abonos llevan el peso fundamental en el desarrollo de esta tecnología donde se trabaja fuertemente por lograr cada día una eficiencia mayor en los procesos con tiempo de retención extremadamente bajos (Zamora, Cisneros, Macías, & López, 2012).

Europa marcha a la cabeza en el uso del biogás en el mundo. En Suecia el biogás mueve un tren de pasajeros entre dos ciudades y también ómnibus. China e India son potencias establecidas en el uso del biogás con millones de biodigestores. Japón, Australia, Nueva Zelanda y Estados Unidos se incorporan a la tendencia mundial. Según Global Industry Analysts Inc., para 2017 el mercado global del biogás llegará a valer 8,98 miles de millones de dólares. (Cubaenergía, 2015)

En Estados Unidos de América existen algunas plantas de biogás de gran tamaño y funcionan eficazmente. Un ejemplo de instalación característica resulta la de una planta de biogás construida para el procesamiento de excreta de vacas lecheras en la ciudad de Monroe, Washington. Esta instalación posee un digestor de 190 m³ de capacidad y comenzó a trabajar en 1977, concebida para 200 vacas estabuladas (Zamora, Cisneros, Macías, & López, 2012).

En Latino América, Guatemala (1954) fue el primer país en iniciar el desarrollo de la tecnología del biogás utilizando muy bajos volúmenes de agua y desechos vegetales y/o animales. Posteriormente, México desarrolla también una tecnología de digestión apropiada en este campo, construyendo plantas de biogás para uso doméstico de muy bajo costo y de fácil difusión (Barrera, 2007).

En la Argentina los biodigestores comenzaron a construirse en los finales de los años 80, desarrollándose en distintas provincias, se utilizaron para abastecer de combustible a comedores escolares, círculos infantiles, escuelas, hogares y centros comunitarios.

También en América Latina, en Colombia, durante el primer semestre de 1997, CIPAV (Centro para la investigación en sistemas sostenibles de producción agropecuaria del valle), dio inicio a un proyecto para la utilización del biogás como reemplazo del combustible diésel en motores de combustión interna para la generación eléctrica (Barrera, 2007).

Según un informe de la ONG internacional Fondo Mundial por la Naturaleza, Costa Rica, Uruguay, Brasil, Chile, Cuba y México lideran en la región los esfuerzos por cambiar de paradigma y optar por energías renovables en lugar de energías fósiles como el petróleo y el carbón (Barreras, 2007).

En el gigante Brasil, un ejemplo de su actividad con el biogás es el estado de São Paulo en el que se ha lanzado un plan Estatal de Biogás para incentivar a las destilerías a producir biogás de vinaza, que una vez purificado se podrá inyectar en la red de gas natural.

Un ejemplo de biodigestión de vinaza con aprovechamiento del biogás se encuentra en la destilería São Martinho, en el Estado de São Paulo. Gracias a un digestor anaerobio de flujo ascendente termofílico de 5.000 m³ de capacidad, produce 300 m³/h de biogás con un 50% de metano, tratando únicamente el 6% de la cantidad de vinaza que produce. El poder calorífico de este gas se utiliza para secar levadura, subproducto del proceso de fermentación que se comercializa como pienso para ganado.

Otro proyecto activo es el de la destilería Ester, que tiene una laguna de tratamiento con captura de biogás. En este caso el biogás se purifica, eliminando la humedad y el H₂S, para ser utilizado en un moto generador de 1MW que genera energía eléctrica para su venta a la concesionaria local.

Otro ejemplo similar es el de la empresa GEO Energética, que tiene 4 MW eléctricos instalados en el Estado de Paraná generando electricidad a partir de biogás de vinaza y otros residuos orgánicos de la plantación de caña.

También en los años 90, la destilería São João adaptó varios vehículos de su flota agrícola para que pudieran utilizar biometano. Infelizmente este importante proyecto no tuvo éxito debido a la caída de los precios del diésel y al fracaso del uso de metano en los motores de mayor potencia (400-500 HP).

Aun así, la opción del uso vehicular no debe descartarse ya que con la cantidad de biogás que puede producirse sería posible substituir la mitad del diésel consumido en el cultivo de la caña, mejorando por tanto el balance energético y de emisiones de GEI del bioetanol.

Los países generadores de tecnología más importantes y de mayor producción de biogás en el mundo en la actualidad son: China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, Brasil, EE.UU., Filipinas y Alemania (Rosas, García, Rivero, Delgado, & Placeres, 2011).

1.3 Situación en Cuba

Según expertos del Grupo Nacional de Biogás, perteneciente al Grupo Central de Energía Renovable y Eficiencia Energética, la primera aplicación industrial del biogás en Cuba data de 1940. En aquel momento se construyeron dos biodigestores para procesar los residuales de la Cervecería del Cotorro. El uso del biogás creció aceleradamente a partir de 1980 y se construyeron biodigestores de las tecnologías de campana flotante y de cúpula fija. El principal uso ha sido en la cocción de alimentos con el consecuente ahorro de combustibles, aunque se ha empleado puntualmente en alumbrado y generación de electricidad. En Magueyal, municipio San Luis en la provincia de Santiago de Cuba, se capta el biogás obtenido en los biodigestores y se

envía a un grupo electrógeno donde se mezcla con diésel para generar electricidad. Ello permite dar más servicio eléctrico ahorrando combustible.

En los años 1990 surgió el Movimiento Nacional de Biogás y hasta el 2006 se construyeron más de 500 plantas. Hoy existen unas 700 plantas de biogás en granjas estatales y en el sector campesino y se continuará construyendo plantas de biogás de pequeña escala en granjas pecuarias estatales, casas de familias campesinas e instalando biodigestores para tratar los residuos porcinos. Se construirán plantas de biogás en destilerías y en los rellenos sanitarios de asentamientos de más de 50 000 habitantes.

Se han identificado potencialidades para usar el biogás en la cogeneración de energía eléctrica y energía térmica a partir de residuales de la industria azucarera y del café, entre otros. Otra vía es captar el biogás que se produce en los rellenos sanitarios debido a la descomposición de la materia orgánica, experiencia que ya se aplica en el relleno de la calle 100 en Marianao. La creación de plantas de biogás en Centros Integrales Porcinos para tratar los residuos y generar electricidad es otra aplicación prometedora.

Según datos del Grupo Nacional de Biogás, el potencial de Cuba supera los cuatrocientos millones de metros cúbicos anuales. Si se aprovechara adecuadamente, se podría instalar una potencia de generación eléctrica de 85 MW y producir más de 700 GWh al año. Así se evitaría emitir más de tres millones de toneladas de dióxido de carbono y se ahorrarían unas 190 mil toneladas de petróleo. Además, se obtendrían unos dos millones de toneladas de abono orgánico al año y se reduciría la carga contaminante. Datos preliminares ubican a Ciudad de La Habana, artemisa, Mayabeque y Pinar del Río, como los territorios con mayor potencial.

En nuestro país las potencialidades del biogás son inmensas en las industrias azucarera, cafetalera, alimentaria y otras, pero su aprovechamiento es ínfimo. Una aplicación más rigurosa de las regulaciones ambientales en cuanto a la disposición de los residuos, podría contribuir a que productores porcinos individuales y empresas estatales porcinas y de otros sectores, adquieran mayor interés en la tecnología del biogás.

En el sector porcino hay más de 9 000 productores que tienen convenios con el Estado. Sin embargo, solo hay unas 500 plantas de biogás para tratar los residuos. Estas producen un millón de metros cúbicos de biogás y unas 2 000 toneladas de fertilizante orgánico al año. Actualmente se crían en contratos unos dos millones de cerdos y con las excretas de cada animal se pueden obtener 0,135 metros cúbicos de «gas biológico» al día. El potencial anual total de este biocombustible ascendería, solo en el sector porcino, a casi cien millones de metros cúbicos. Con estos se pueden cocinar 294 millones de comidas, suficientes para unas 67 000 familias. ¿Qué cantidad de vehículos podrían transitar nuestras carreteras utilizando biogás, en lugar de tener el aire cargado con el humo y las partículas que hoy despiden al emplear diésel?

Por otra parte, cuando se quema el biogás se destruyen las moléculas de CH₄ que este contiene y el metano ya no va a la atmósfera. Así contribuimos a evitar que el planeta se siga calentando, ya que este es un GEI con un potencial de calentamiento global 21 veces mayor al del CO₂. El uso masivo del biogás puede constituir un proyecto del Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL), del cual Cuba participa. De este modo no enviamos los residuos al entorno, ahorramos dinero, pues se puede producir electricidad, cocinar, transportarnos o refrigerar sin usar combustible fósil, y ganamos dinero al inscribir proyectos MDL que eviten emisiones y nos permitan disponer de los Certificados de Emisiones Reducidas.

Cuba en este tema, traza una política positiva en favor del desarrollo de la producción de biogás de diferentes formas. Por lo que se puede plantear que la generación de energía eléctrica es otra de las alternativas de diversificación de las producciones de una planta de biogás lo que puede constituir una oportunidad. Si se tienen en cuenta las transformaciones del sistema electroenergético nacional que basa ahora la generación en la utilización de grupos electrógenos (Motores de combustión interna) que consumen diésel y fuel oíl como combustible y para los cual se reportan trabajos como CIPAV, 1997, que asegura que el biogás puede sustituir a estos hasta en un 80 %.

Cuba, dentro de estos países, tiene una privilegiada situación social debido a la alta conciencia energética de los cubanos, así como su educación medio ambiental inculcada desde las edades más tempranas, sin embargo no es ajena a las limitaciones económicas, a pesar de ello los cubanos no renuncian al empleo de estas fuentes de energía y mediante diversas vías en la que se incluyen los proyectos internacionales, se promueve el uso de las mismas (Comisión nacional de energía, 1993).

La generación de energía a partir de biomasa es una de las fuentes renovables con mayores potencialidades en Cuba, estando entre los países latinoamericanos de mayor generación bioenergética aprovechable de residuales agropecuarios. El potencial de biogás en las condiciones actuales está en el orden de 152 mil toneladas de combustible convencional por año, proveniente de entre unos 80 a 100 millones de m³ de vertimientos y biodegradables que constituyen hoy en día, en su conjunto, una de las principales fuentes de contaminación del país.

La primera planta de biogás en Cuba, después del triunfo de la Revolución se construyó en San Antonio del Sur, Provincia de Guantánamo, con un digestor alimentado con las excretas de unas 10 ó 15 vacas, el cual beneficiaba unas siete

familias que usaban el biogás producido para la cocción de los alimentos. A finales del quinquenio 1980-1985 en el país se encontraban funcionando más de mil digestores.

Una de las vías utilizadas es la digestión anaerobia de residuos agropecuarios, industriales y sólidos urbanos que contribuyen seriamente a la contaminación ambiental, fundamentalmente, de las aguas superficiales y subterráneas. Como sistema de tratamiento se caracteriza por su bajo costo, construcción compacta, producción de energía a través del biogás producido y la producción de lodo biofertilizante, lo cual resulta económico y ambientalmente favorable.

La solución de tratamiento a los residuales en forma anaerobia (sin oxígeno), es más efectiva y controlada que las soluciones tradicionales de tratamiento que acostumbramos a hacer mediante lagunas de oxidación, vertimientos a cañadas, ríos o al mar directamente en algunos casos. No hay problemas de desastres ecológicos. En Cuba existen ejemplos convincentes de vertimientos biodegradantes que han destruido bancos de ostiones, bancos de mangles, muertes de peces en ríos y presas, contaminación de agua para uso social, destrucción de la vida marina en la desembocadura de los ríos contaminados.

El tratamiento de residuales mediante fermentación anaerobia elimina los malos olores de la descomposición de cualquier materia orgánica, no atrae moscas u otros vectores evitan los problemas de infiltración de materia orgánica sin digerir al manto freático o cursos de agua.

En el país se construyeron alrededor de 550 instalaciones pequeñas de biogás en vaquerías rústicas, con el propósito de sustituir el mechón o lámpara de keroseno artesanal para el alumbrado de las instalaciones durante la jornada del ordeño manual en horas de la madrugada. Cada día estas plantas de biogás han ido abandonándose, llegando hoy a la cifra de 4 000 instalaciones y donde sólo trabajan el 70 % de ellas.

En la industria azucarera cubana ya se observan algunos trabajos tal es el caso del ICIDCA, que ha desarrollado una tecnología basada en reactores del tipo UASB, de origen holandés, única de su tipo en el país y de 3.000 m³ de capacidad. La misma ha sido destinada al tratamiento de las aguas residuales de la Empresa Mielera Heriberto Duquesne, en Remedios, Villa Clara (Obaya, 2004). Esta planta tiene en cuenta en su diseño el pretratamiento de los sustratos, la digestión anaerobia, la purificación el uso final del biogás y empleo de los bioabonos, pero dificultades en la etapa de purificación han obstaculizado el aprovechamiento del gas en un generador de vapor, lo que atenta contra el entorno por la quema directa del combustible al medio ambiente, contra la recuperación de la inversión y contra el rendimiento energético de la planta.

Dentro de los residuos sólidos de mayor disponibilidad en Cuba se encuentra la cachaza, subproducto del proceso de fabricación de azúcar de caña, obtenido en la etapa de clarificación y filtración del jugo de caña (Torres, Villa, Montalvo, & Escobedo, 2012)

1.4 Producción de biogás a partir de la cachaza de caña de azúcar.

La cachaza: También llamada lodo de filtros o torta del filtro, es de los más importantes residuos de la industria del azúcar de caña, y su coste comparativamente bajo la hace interesante frente a otros productos orgánicos.

Se produce: en el proceso de fabricación de azúcar, en la fase de clarificación y filtración del jugo de la caña de azúcar entre 30 y 50 kg por tonelada de materia prima (caña) procesada, lo cual constituye entre 3 y 5 % de la caña molida. Esta proporción y su composición varían con las particularidades agroecológicas del área de cultivo que se utilice, la eficiencia de la producción, el procedimiento de clarificación practicado, entre otros elementos; la cachaza es producida durante la clarificación que se le hace al jugo de caña en la industria.

Este material es acopiado a la salida de los filtros al vacío, mostrando aproximadamente un 25% de materia seca. Este producto contiene muchos de los coloides de la materia orgánica originalmente dispersa en el jugo, conjuntamente con aniones orgánicos e inorgánicos que precipitan durante la clarificación. Otros compuestos que no son azúcares se incluyen en esos precipitados; sin embargo, por su elevado contenido de humedad, por presentar olores desagradables, por su baja relación peso/volumen (igual a 0,375), por ser fuente de criaderos de moscas y otras plagas, y por tomar combustión espontánea en estado seco al exponerse al sol, la mayoría de los ingenios azucareros presentan problemas con su acumulación, transporte y manejo. Por ello, no es plenamente aprovechada y se dificulta su eliminación.

La cachaza es un material esponjoso, amorfo, de color oscuro a negro, que absorbe grandes cantidades de agua. Generalmente este producto es rico en fósforo, calcio y nitrógeno, y pobre en potasio. Los altos contenidos en nitrógeno se deben a la elevada cantidad de materia orgánica que presenta este residuo; los micronutrientes contenidos en ella se derivan parcialmente de las partículas que van adheridos a la caña (Aguilar, Rivera, Rodríguez, & Castillo, 2010)

Al comparar las características generales y estructura de la cachaza de caña, se aprecia que estos parámetros pueden variar considerablemente en dependencia del origen, tipo de variedad de caña, tecnología de fabricación aplicada, además de la composición de los suelos en las áreas de cultivos (Fonte & Tabla, 1999).

Todos estos elementos tienen una influencia marcada en la producción y los rendimientos que se pueden obtener en la generación de biogás utilizando como materia orgánica la cachaza de la producción de azúcar de caña.

La cachaza tiene un contenido elevado de materia orgánica, lo que justifica su utilización en la generación de gas metano para diferentes usos, tanto industriales como domésticos. Es por esto que constituye una materia prima en cantidad y en calidad suficiente para abastecer un proceso continuo de producción de gas metano y fertilizantes, alcanzándose alta eficiencia de conversión de la biomasa en energía con valores superiores al 80% en muchos casos reportados en la literatura por varios autores y contribuyendo al desarrollo de las fuentes renovables de energía en el planeta. Esta transformación se convierte en beneficiosa y necesaria para el ecosistema en donde se desarrolla el proceso y también para la reducción de carga orgánica contaminante, asimismo es un sistema idóneo de eliminación de residuos, con la subsiguiente mejora del contexto urbano, rural e industrial.

Según la literatura consultada el índice de producción de biogás obtenido para la cachaza es de 120 m³/tonelada (Hermida & López, 2006), coincidiendo con varios autores que han trabajado la temática.

Este índice de producción de biogás en suspensiones cachaza-agua puede ser afectado considerablemente por diferentes factores entre los que se encuentran:

1.4.1 Factores que pueden afectar el proceso de digestión anaeróbica de la cachaza en la producción de biogás.

Los factores físicos y químicos que condicionan este proceso son varios. Entre los más importantes caben destacar los siguientes: nutrientes, temperatura, pH, contenido en sólidos, tiempo de residencia, presencia de compuestos inhibidores del proceso y agitación (Cuesta, Martín, Vicente, & Villar, 2008) además de otros que intervienen.

- Composición y características de la materia orgánica a emplear:

Dependen del origen, tipo de variedad de caña y los tipos de suelos, por la tierra que se incorpora a este producto final.

- El valor de PH:

El PH inicial juega un papel importante en el desarrollo del proceso y no debe tener un valor cercano a 8,0, ya que mientras mayor sea éste, más afectación tendrá el proceso para iniciar la generación de gas. El rango óptimo en general debe estar entre 6.5 y 7.5.

- Temperatura de la solución cachaza – agua durante el proceso de digestión anaeróbica:

Se recomienda mantener una temperatura de 36 ° C, para lograr que las bacterias digestivas trabajen con la mayor eficiencia.

- Concentración de sólidos totales:

La más efectiva para este tipo de sustrato, en dependencia de las características específicas de estos elementos ya que tienen una influencia marcada en la producción y los rendimientos de biogás.

Contenido en sólidos

Es también un factor determinante, ya que la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y, por lo tanto, pueden verse afectadas la eficiencia y producción de biogás. Sin embargo, se puede encontrar en la literatura datos de producciones de gas importantes logradas en rellenos sanitarios con un alto contenido de sólidos (Cuesta, Martín, Vicente, & Villar, 2008).

- Tipo de digestor:

Según tipo de sustrato, producción de gas y eficiencia en la remoción de sólidos necesaria.

- Inhibidores:

Existen una gran cantidad de sustancias que pueden inhibir la digestión anaeróbica.

Entre ellos, el oxígeno, la cantidad de nitrógeno, amoníaco, metales pesados, sustancias antibióticas, detergentes en determinadas cantidades y altas concentraciones de ácidos volátiles.

Por último, una concentración elevada de ácidos volátiles puede producir un efecto inhibitor.

- Composición lignocelulosa de la cachaza a utilizar:

Esta estructura que presenta este residuo orgánico, lo convierte en complejo debido a la relativa baja biodegradabilidad de la lignina que es una forma de carbono no digerible por las bacterias.

- Materia prima con o sin pretratamiento:

Existen materiales complejos como la cachaza que aun cuando el tamaño de sus partículas haya sido reducido, muestran resistencia a la biodegradabilidad entre ellos los residuos celulíticos de la cachaza, a los cuales se recomienda realizar un pretratamiento químico (alcalino) (ICIDCA-GEPLACEA-PNUD. , 1990)

Existen varias formas de pretratamiento alcalino unas utilizan como álcalis el NaOH y otras el Ca (OH)_2 en ambas se incrementa el área superficial producto del hinchamiento de la celulosa y se produce una disminución de la cristalinidad de la misma mejorando el rendimiento de los sustratos y su biodegradabilidad (Jerger, Dolenc, & Chynoweth, 1983), (López, 2000.)

Los principales estudios de solubilización química se llevan a cabo con el empleo de NaOH. Sin embargo, el Ca (OH)_2 puede generar ventajas económicas debido a sus bajos costos y procedencia nacional, lográndose los mejores resultados con la adición de 3,20 Kg/m³ de residuo y empleando un tiempo de solubilización de 6 horas para la cachaza

Por otra parte los pretratamientos térmicos son otra de las alternativas que dentro de esta categoría conduce a un mejoramiento en la eficiencia del proceso de digestión. Hay autores que hacen referencia a los problemas que conlleva el uso de esta opción, asociado a los requerimientos excesivos de energía para el calentamiento y enfriamiento del residual (Pinnekamp, 1989), (Hwang, Shin, & Choi, 1997) pero en el caso de producción de azúcar de caña este pretratamiento térmico a la fibra se produce simultáneamente con el proceso de producción general.

Resumiendo, es necesario un pre tratamiento, el mismo debe ser térmico, químico o ambos, para evitar que se dificulte la acción de los microorganismos anaerobios en metabolizar el residuo, limitando la velocidad de degradación del material orgánico complejo.

- Relación Carbono / Nitrógeno:

La razón de carbono a nitrógeno (C/N) representa la proporción de los dos elementos. Una razón C/N de 30/1 (30 veces más carbono que nitrógeno) permitirá que la digestión se lleve a cabo a un ritmo óptimo. Los alimentos principales de las bacterias anaeróbicas son el carbono y el nitrógeno (Barra & Szockolay, 1988).

- Tiempo de retención.

Específico para cada tipo de sustrato.

Se define como el tiempo que el sustrato está sometido a la acción de los Microorganismos en el reactor.

1.5 - Utilización del biogás

Los sistemas de biogás pueden proporcionar beneficios a sus usuarios, a la sociedad y al medio ambiente en general.

- Obtención de energía.

a. Calor.

b. luz

c. energía eléctrica

- Como combustible, para transporte automotor.
- Como gas de refrigeración.
- Mejoras ambientales a través de la protección del suelo, del agua, del aire, la vegetación y la reducción de la deforestación.
- Reducción de la cantidad de trabajo relacionado con la cosecha de leña para cocinar.
- Disminución del corte de árboles para su uso como combustibles
- Progreso de los entornos higiénicos a través de la reducción de patógenos, huevos de gusanos y moscas.
- Transformación de desechos orgánicos en biofertilizante de excelente calidad, rico en nitrógeno, fósforo y potasio.
- Reducción de la contaminación, sobre todo en áreas urbanas.

Por lo tanto, la tecnología del biogás que se obtiene de la biomasa, favorece trascendentalmente la conservación y la mejora ambiental de forma general. Sin embargo, la cantidad de dinero necesario para acometer la instalación de las plantas puede ser en muchos casos prohibitivo para la población rural. Por lo que, se deben concentrar los esfuerzos en desarrollar sistemas más baratos y en proporcionar a los interesados algún crédito u otras formas de préstamo. El financiamiento por parte del gobierno podría manejarse como una inversión para minimizar consumos futuros concernientes con la importación de derivados del petróleo y fertilizantes inorgánicos, con la degradación del medio ambiente, y con la salud y la higiene. Más del 90% de la energía utilizada en la vida moderna proviene de los combustibles fósiles. Otro medio utilizado es la leña, pero ha resultado de una deforestación acelerada del planeta. Este

escenario, se agrava con el rápido incremento de la población mundial y la contaminación que hace la agroindustria y la ganadería con sus residuales a las fuentes de agua potable y los suelos.

1.5.1 Aplicaciones del biogás obtenido de la biomasa

Con un metro cubico de biogás se puede:

1. Iluminar una habitación con una lámpara durante seis horas, equivalente a un bombillo de 60 watt.
2. Mover un motor de 2 HP durante una hora.
3. Generar 1.25 KW/h de electricidad.
4. Mover un camión de cuatro toneladas en un recorrido de 28 Km.
5. Sustituir el acetileno en la soldadura autógena.
6. Sustituir 0.6 Litros de kerosene.
7. Heladeras domésticas.

En la tabla 1.1 se han listado los principales artefactos que utilizan biogás juntamente a su consumo medio y su eficiencia.

Tabla 1.1 Consumo medio y eficiencia de los principales artefactos que utilizan biogás

Artefacto	Consumo	Rendimiento (%)
Quemador de cocina	300 – 600 l/h	50 - 60
Lamparilla a Mantilla 60W	120 – 170 l/h	30 - 50
Heladera de 100 L	30 – 75 l/h	20 – 30%
Motor a gas	0,5 m ³ /kWh o Hph	25 - 30
Quemador de 10 kW	2 m ³ /h	80 - 90
Infrarrojo de 200 W	30 l/h	95 - 99
Co - Generador	1Kw	
térmica	2kw	90

1.6 Ventajas del uso del biogás:

- 1.** Es un combustible limpio, no produce hollín.
- 2.** Su empleo reduce la contaminación ambiental y mejora las condiciones sanitarias.
- 3.** Su procesamiento permite obtener volúmenes de abono de mejor calidad que al usar la excreta directamente sobre el terreno.
- 4.** Su utilización permite eliminar la leña como combustible para cocinar y, por tanto, contribuye a mantener los recursos forestales.
- 5.** El biogás es un recurso bioenergético de gran valor como ya se planteó, es renovable y se puede usar para producir electricidad, para la iluminación, la cocción de alimentos y el funcionamiento de los motores de combustión interna de los medios de transporte automotores.
- 6.** Las cocinas y calentadores son fácilmente modificables, agrandando el paso del gas de los quemadores. La amplia disponibilidad de este tipo de equipos hace promisorio e interesante su utilización a gran escala.
- 7.** En el mundo se emiten anualmente unos 6400 millones de toneladas de metano, representando un 15 por ciento de las emisiones globales de GEI. Este gas con alto potencial de calentamiento global, puede ser aprovechado para garantizar servicios energéticos sostenibles y combatir el cambio climático.

¿Qué beneficios aporta la instalación de una planta de Biogás?

Una planta de biogás es una instalación estéticamente agradable que permite, con mínimos gastos de construcción y una atención muy sencilla en su operación, lo siguiente:

- Se tratan totalmente los desechos orgánicos o residuales contaminantes, por lo que se elimina su efecto perjudicial para la salud, los malos olores y la contaminación del entorno.
- Aprovechar el biogás producido para emplearlo en las necesidades energéticas en la cocción de alimentos, en el hogar o en comedores, y eliminar así el empleo de queroseno (luz brillante), petróleo, leña o cualquier combustible que comúnmente se utilice y que pueda resultar deficitario e incómodo.
- Aprovechar el biogás en el alumbrado de viviendas o en instalaciones o locales que requieran iluminación nocturna, lo que sustituye el empleo de energía eléctrica u otro tipo de fuente energética.
- Aprovechar el biogás producido como combustible en equipos que posean motores de combustión.
- Incrementar en más de 25 % el rendimiento de las cosechas o huertos, con el empleo del material o lodo que se extrae del biodigestor (bioabono), después del proceso de fermentación y producción del biogás.
- Aprovechar el material extraído del biodigestor, o sea, el bioabono, como componente nutritivo importante para la alimentación de las aves de corral, peces, ganado, etcétera.
- Lograr independencia como consumidor energético y de fertilizantes químicos (Cuesta, Martín, Vicente, & Villar, 2008)

Para demostrar la factibilidad del empleo de digestores de biogás se hace necesario contar con las herramientas que permitan determinar las potencialidades de la productividad energética y de higiene ambiental lo más objetivamente posible; es decir, disponer de instrumentos para la evaluación de digestores de biogás, en específico a partir de los diferentes sustratos a utilizar, ya que hoy en el mundo existe un interés evidente en desarrollar la producción de las fuentes renovables de Energía.

El diseño y dimensionamiento de un Biodigestor depende en lo fundamental de los siguientes factores:

- a) Tipo y composición del material orgánico.
- b) Demanda del Biogás y Biofertilizante.
- c) Empleo de materiales de construcción locales y económicos. Uso de tecnologías constructivas rápidas y sencillas.
- d) Facilidad de explotación y mantenimiento.

Estos cuatro factores pueden ser resumidos en dos:

- Factibilidad que justifique la inversión (necesidad y condiciones creadas).
- Características y situación económica del usuario (Guardado, 2007).

1.7. Conclusiones parciales

1. La consulta bibliográfica demuestra que en Cuba los esfuerzos de generación de biogás han estado dirigido a residuos de cosechas y sustratos de origen animales con una pobre utilización de los residuos de la industria azucarera.
2. Dentro de los residuos de la industria azucarera, la cachaza representa uno de los de mayores posibilidades de generación de biogás y sin embargo su utilización se ha limitado a su aplicación directa al suelo como fertilizante.
3. Los estudios revisados sobre la generación de biogás a partir de cachaza están orientados a la determinación de parámetros químicos del sustrato y factores que afectan la digestión anaeróbica y no al diseño de plantas industriales para este sustrato.
4. En la literatura consultada no se reportan procedimientos para la optimización técnico-económica del diseño de plantas de biogás desde etapas tempranas de su concepción.

Capítulo 2. Modelación para el cálculo y optimización de una planta de generación de biogás.

El problema que plantea el diseño óptimo de una planta de biogás puede ser resuelto a partir de las metodologías de cálculo de biodigestores reportados en la literatura especializada y utilizando métodos de búsqueda estocástica como algoritmos de optimización. En la literatura consultada no se encontró una metodología para este tipo de diseño, optimizado desde el punto de vista económico y que emplee cachaza como sustrato. En Cuba ha sido ampliamente abordada la generación de biogás con cachaza y vinazas, pero no se reporta ninguna evaluación de alternativas para inversiones de sistemas de este tipo empleando criterios para su optimización económica. El objetivo de este capítulo es presentar el desarrollo de un modelo para optimizar el diseño de una planta de generación de biogás a partir de la cachaza.

2.1 Consideraciones utilizadas para el modelo.

El diseño y optimización de una planta de biogás es un problema más o menos complejo dependiendo del tipo de biodigestor, sustrato y uso final del biogás. En este estudio es necesario plantear las consideraciones generales siguientes:

1- En una primera etapa solo se trabajará con tecnología simple y de flujo continuo, específicamente del tipo de cúpula fija debido a que:

- Su obra se ejecuta con paredes de bloques de hormigón y cúpula de ladrillos, utilizando otros materiales conocidos como cemento, arena, piedra y acero constructivo, asegurando con ello una alta resistencia y conservación de la obra.
- No contiene partes móviles vulnerables al desgaste, así como tampoco partes metálicas sensibles a la corrosión.
- Su tiempo de vida útil se extiende a 20 años.

2.2 Método de cálculo

2.2.1 Determinación del volumen de biogás necesario

Como el modelo se concibe para diseñar biodigestores que satisfagan las necesidades de cocción de una comunidad, así como para otros consumidores sociales como comedores obreros, el volumen de combustible necesario se calcula según las ecuaciones (2.1) y (2.2):

$$V1 = 7.08 + 0.073 * Ct \quad (m^3) \quad (2.1)$$

donde:

V1: demanda de biogás para cocción en comedores industriales, en m³ (Barrera, 2007)

Ct: total de comensales.

$$V2 = 0.4 * Nump * Nuc \quad (m^3) \quad (2.2)$$

donde:

V2: demanda de biogás para uso doméstico considerando un índice de consumo por persona de 0.4 m³/día. El índice de consumo con una presión de 75-90 mm.c.a es de 0,38-0,42 m³ por persona-día (Guardado, 2007).

Nump: Número de personas promedio por núcleo

Nuc: cantidad de núcleos

La demanda total para cocción (*Vol_cocción*) se determina como la suma de (2.1) y (2.2).

El volumen de construcción del digestor (*Vcd*) se determina según la ecuación (2.3) como:

$$Vcd = 1.3 * Vd \quad (m^3) \quad (2.3)$$

donde:

V_d : es el volumen de digestión calculado como:

V_d

$$= \frac{(Cachaza + 3 * Cachaza) * 1000 * 30}{\rho_{mezcla}} \quad (m^3) \quad (2.4)$$

Siendo:

$Cachaza$: la cantidad de cachaza necesaria para generar el volumen de biogás para cocción considerando un índice de generación de biogás de 120 m³/t de cachaza.

ρ_{mezcla} : densidad de mezcla cachaza-agua en kg/m³

Para satisfacer la demanda de cocción calculada, se diseña un número de biodigestores de cúpula fija cuyo volumen total sea igual al volumen de construcción del digestor, calculado por (2.3).

2.2.2 Dimensionamiento de un biodigestor de cúpula fija.

En el dimensionamiento de los biodigestores de cúpula fija (Figura 2.1) se consideran las siguientes proporciones (Guardado, 2007):

U

$= R$

$$/4 \quad (m) \quad (2.5)$$

h_c

$$= 2 * U \quad (m) \quad (2.6)$$

h_p

$$= 3 * U \quad (m) \quad (2.7)$$

R_c

$$= 5 * U \quad (m) \quad (2.8)$$

D

$$= 8 * U \quad (m) \quad (2.9)$$

ht

$$= 0.15 * D \quad (m) \quad (2.10)$$

En las expresiones de la (2.5) a la (2.10) las dimensiones consideradas son:

U : es unidad en metros,

hc : Altura cúpula,

hp : Altura de pared,

Rc : Radio Básico,

D : Diámetro ($2 \times R$)

ht : Altura del cono de Base

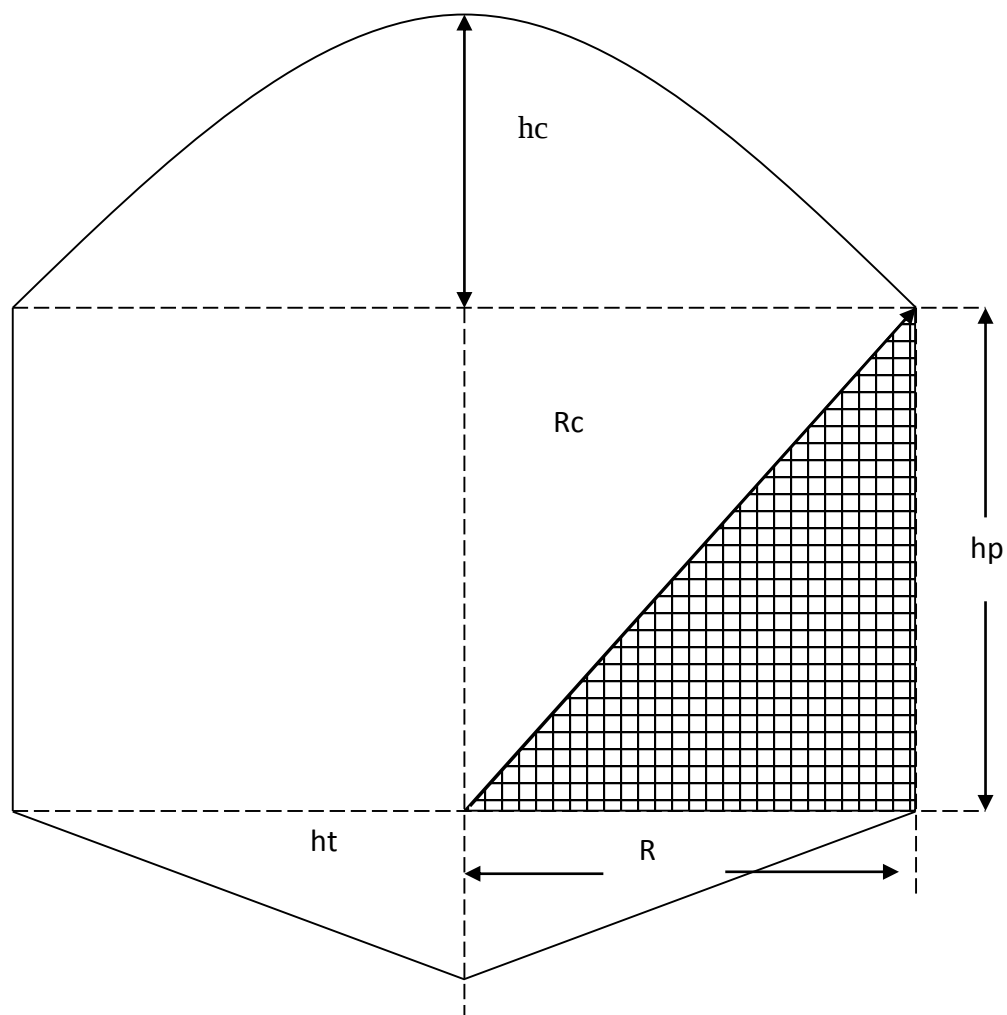


Figura 2.1. Dimensiones del digestor de cúpula fija.

El volumen del biodigestor es:

$$V_{digestor} = R^3 * \pi * 1.121 \quad (m^3) \quad (2.11)$$

El volumen total (VT) es:

$$VT = N * V_{digestor} \quad (m^3) \quad (2.12)$$

2.3 Cálculo del costo de la inversión

Para calcular el costo capital de la inversión es necesario modelar el consumo de materiales fundamentales. Guardado realiza los cálculos en función del volumen del biodigestor (Guardado, 2007) pero pueden obtenerse diseños con iguales volúmenes totales y diferentes áreas constructivas por lo que para mayor certidumbre se calcula el costo de la inversión en función de las áreas constructivas de cada una de las partes.

Las expresiones para calcular estas áreas son:

$$A_{cuerpo} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot hp \quad (2.13)$$

$$A_{cono} = \pi \cdot R \cdot \sqrt{ht^2 + R^2} \quad (2.14)$$

$$A_{domo} = 2 \cdot \pi \cdot Rc^2 \cdot \left(1 - \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{R}{Rc} \right) \right) \right) \quad (2.15)$$

El área total es la suma de cada una de ellas multiplicada por el número de biodigestores.

Las ecuaciones que modelan la cantidad de materiales, multiplicadas el precio dan como resultado las ecuaciones (2.16) a (2.21) empleadas para calcular el costo de los materiales en función del área del digestor y del precio del material.

$$Cemento = P_{cemento} \cdot (0.3 \cdot (A_{cuerpo} + A_{domo}) + A_{cono} + 10 \cdot 0.15^2 \cdot \pi \cdot D) \quad (\$) \quad (2.16)$$

$$Arena = P_{arena} \cdot (0.1 \cdot (A_{cuerpo} + A_{domo}) + 0.033 \cdot A_{cono} + 0.3 \cdot 0.15^2 \cdot \pi \cdot D) \quad (\$) \quad (2.17)$$

$$Gravilla = P_{gravilla} \cdot (0.05 \cdot A_{cono} + 0.5 \cdot 0.15^2 \cdot \pi \cdot D) \quad (\$) \quad (2.18)$$

$$Bloque15 = P_{bloque} \cdot (13 \cdot A_{cuerpo}) \quad (\$) \quad (2.19)$$

$$Ladrillo = P_{ladrillo} \cdot (30 \cdot A_{domo}) \quad (\$) \quad (2.20)$$

$$Cabilla = P_{cabilla} \cdot 0.675e^{-3} \cdot (8 \cdot A_{cono} + 4 \cdot \pi \cdot D) \quad (\$) \quad (2.21)$$

Donde $P_{cemento}$, P_{arena} , $P_{gravilla}$, P_{bloque} , $P_{ladrillo}$ y $P_{cabilla}$ son los precios de los materiales respectivos. Los valores empleados son los siguientes:

$$P_{cemento} = 3.58; \quad \$/bolsa$$

$$P_{arena} = 3.35; \quad \$/m^3$$

$$P_{gravilla} = 12.26; \quad \$/m^3$$

$$P_{bloque} = 1.072; \quad \$/u$$

$$P_{ladrillo} = 0.72; \quad \$/u$$

$$P_{cabilla} = 625; \quad \$/tn$$

El costo total de los materiales (*Costo Materiales*) se considera como la suma de las ecuaciones de la (2.16) a la (2.21) afectándola por un factor de 1.55 para considerar combustibles y otros gastos. Este factor se obtiene de relacionar por cociente los gastos totales (incluyendo combustibles, movimiento de tierra y otros gastos) con el costo de los materiales fundamentales para un biodigestor de cúpula fija reportado por Guardado (Guardado, 2007)

El costo total de la inversión es:

$$Ko = (N * Costo Materiales) + Compresor) * 1.10 \quad (2.22)$$

donde:

N: Número de biodigestores

Compresor: Costo de la estación de compresores. Se estima 7000 pesos en MT (Barrera, 2007).

El factor 1.10 de la ecuación (2.22) se utiliza para considerar los costos de construcción y montaje, y se deriva del análisis mostrado en el Anexo A. Para obtener el factor 1,10 de referencia, se utilizó el método de Peter (Peters, M.S., & Timmerhous, 1970) con la particularidad que fue necesario obtener el exponente típico de esta planta no reportado en la literatura.

2.4 Flujos de caja anuales

Para el cálculo económico se utilizan métodos de flujo descontados para considerar el valor del dinero en el tiempo. Un indicador económico utilizado en el análisis de rentabilidad de una inversión es el valor Actual Neto (VAN). Para calcular el VAN es necesario determinar los flujos de caja anuales a partir de los ingresos y gastos que tienen lugar en la instalación.

Los ingresos anuales por venta de gas del año i -ésimo considerando que se produce 6 meses al año y 30 días por mes se calculan como:

$$I_{gas_i} = Vol_{cocción} * 30 * 6 * P_{gas} \quad (2.23)$$

Además de la venta de gas se consideran ingresos por venta de bioabono los cuales se calculan como:

$$I_{bioabono_i} = (Cachaza + 3 * Cachaza) * 0.75 * 30 * 6 * P_{bioabono} \quad (2.24)$$

El ingreso total anual (I_i) es la suma de (2.23) y (2.24)

Los gastos anuales (G_i) se consideran de un 5% a un 6% del costo de la inversión. En este tipo de planta los gastos anuales se limitan prácticamente a salario de un operador durante 6 meses, o sea 2418 pesos/año.

La depreciación se considera lineal y se calcula como:

$$Dep = \frac{Ko}{T} \quad (2.25)$$

El flujo de caja anual es:

$$Fc_i = (I_i - G_i - Dep) * \left(1 - \frac{t}{100}\right) + Dep \quad (2.26)$$

Donde:

t : es la tasa de impuestos en %

i : es el año que se está considerando

El flujo de caja descontado es:

$$Fcd_i = Fc_i \cdot FD_i$$

Donde FD_i es el factor de descuento que se calcula con la tasa de descuento D como:

$$FD_i = (1 + D)^{-i}$$

Con los flujos de caja anuales descontados se calcula el VAN como:

VAN

$$= -K_0 + \sum_{i=1}^n Fcd_i \quad (2.27)$$

2.5 Evolución artificial con algoritmos genéticos (AG).

La solución de problemas de cómputo difíciles ha llevado a la necesidad de desarrollar técnicas no convencionales entre las que se encuentran aquellas inspiradas en modelos biológicos. Un modelo que explica la destreza de los organismos vivos para perpetuarse a través de una descendencia exitosa es el proceso de evolución natural. Este ha servido de inspiración para proponer soluciones novedosas a diversos problemas en el campo de la ingeniería a partir de métodos conocidos como computación evolutiva dentro de los que se encuentran los AG.

Los AG, constituyen una representación del modelo evolutivo, de manera que un problema específico actúa como medio ambiente dentro del cual se desempeña una población formada por individuos que son soluciones candidatas del problema en cuestión. Cada uno de estos individuos (fenotipo), está formado por la información contenida en su genoma (genotipo) y que bien pueden ser las variables independientes cuyo valor deseamos conocer.

Similarmente a como se propone para la evolución natural, los AG tienden a encontrar mejores soluciones al problema de manera progresiva, gracias a la “renovación del material genético” en la población por medio de los llamados operadores genéticos. La adaptación de los individuos a su ambiente, se determina por la función de salud o adaptación (función de fitness), la cual constituye una medida de la calidad de la solución.

En general, el AG procede como sigue:

1-Generación aleatoria o heurística de una población inicial, $P(0)$.

2-En cada ciclo evolutivo t (generación), se selecciona un subconjunto de individuos $P'(t)$, después de ser evaluados bajo el criterio predefinido por la función fitness para reproducirse. Los individuos más aptos (con mayor fitness) tienen más posibilidades de reproducirse, mientras los menos aptos (de menor fitness) tienden a desaparecer.

3-Se modifica la población seleccionada, para encontrar nuevos puntos en el espacio de búsqueda, aplicando operadores genéticos como el cruzamiento y la mutación.

4-Se introducen los nuevos individuos $P''(t)$ en la población de la siguiente generación $P(t+1)$ y se repite el proceso a partir de la selección de los más aptos.

5-El fin de la búsqueda queda condicionada a un número determinado de generaciones, a la obtención de un valor aceptable de fitness, etc.

El pseudocódigo de un AG básico es la siguiente (Estévez, 1997), (Restrepo, Peña, & Pérez, 2000)

comenzar

$t=0$

inicializar $P(t)$

evaluar $P(t)$

mientras (no condición de término) hacer:

$t=t+1$

seleccionar $P(t)$ a partir de $P(t-1)$

cruzamiento y/o mutación $P(t)$

evaluar $P(t)$

fin

fin

El cruzamiento permite al proceso evolutivo moverse hacia mejores regiones en el espacio de búsqueda, mientras que la mutación previene de una convergencia prematura hacia óptimos locales, al muestrear aleatoriamente nuevos puntos del espacio de búsqueda.

Los elementos de búsqueda que se combinan en los AG (búsqueda determinística y estocástica) presentan algunas ventajas con relación a otros métodos basados en gradientes, aleatorios, exhaustivos, etc. Entre las ventajas de los AG podemos mencionar las siguientes:

- No necesitan un conocimiento auxiliar del problema tales como derivadas o buenas suposiciones iniciales.
- Exploran simultáneamente muchos puntos del espacio de búsqueda y por tanto evitan más fácilmente la convergencia hacia un óptimo local.
- Alcanzan un buen equilibrio entre la explotación de las mejores soluciones y la exploración del espacio de búsqueda.

Aprovechando estas ventajas se utiliza el AG del toolbox del Matlab 7.0 como herramienta de optimización.

2.6 Aplicación del AG a la optimización del diseño de biodigestores.

El método propuesto permite determinar el número de biodigestores y el radio básico a partir del cual se calculan el resto de las dimensiones del biodigestor de cúpula fija garantizando satisfacer las necesidades de cocción de una comunidad, a la vez que se maximiza el Valor Presente Neto (VAN) de la inversión requerida.

2.6.1 Población inicial para el AG.

Para el algoritmo propuesto se genera una población inicial de 1000 soluciones candidatas representadas por los pares $(X(1), X(2))$ donde $X(1)$ es el número de biodigestores y $X(2)$ es igual al radio básico (R).

Durante el proceso evolutivo, el AG genera una nueva población de tamaño 1000 a partir de la población actual y evalúa el desempeño de los nuevos individuos en cada generación.

2.6.2 Función de adaptación del AG.

El objetivo de la optimización con AG es minimizar el error entre los valores necesario de volumen de construcción del digestor (V_{cd}) y el volumen total calculado (VT), a la vez que se maximiza el VAN de la inversión. Como el AG solo busca valores mínimos, se hace necesario entonces minimizar el inverso del VAN. Por lo tanto, la función de adaptación del AG es:

$$fitness = |V_{cd} - VT| + \frac{1}{VAN} \quad (2.25)$$

El cálculo de esta función se repite para cada nuevo individuo (nuevo conjunto de número de digestores y radio básico) hasta que se cumplen los requisitos de parada del AG.

2.6.3 Opciones utilizadas en el AG.

Para el procedimiento genético, el AG del Matlab 13.0 da varias opciones para los operadores genéticos a emplear, los utilizados en todas las variantes son:

- **Operador de selección:** estocástico uniforme.
- **Reproducción:** elitismo = 2, factor de cruzamiento = 0,8.
- **Mutación:** uniforme, razón = 0,01.
- **Cruzamiento:** heurístico, razón = 1,5.
- **Criterio de parada:** Fitness límite = 2×10^{-15} , o sea, el AG va obteniendo progresivamente mejores soluciones y detiene la búsqueda cuando el valor promedio de la función fitness del mejor individuo está por debajo de este valor especificado.

Esto significa convergencia y obtención de parámetros que garantizan prácticamente un error igual a cero.

El diagrama de bloques del procedimiento propuesto se muestra en la Figura 2.2.

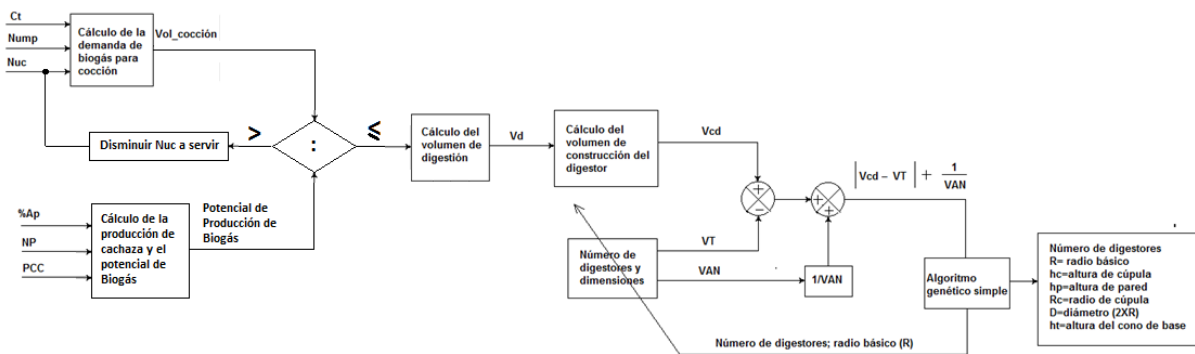


Figura 2.2 Diagrama de bloques del modelo de optimización propuesto para el diseño de biodigestores.

A partir del número de comensales en comedores obreros y de la población de la comunidad a servir se calcula la demanda de biogás para cocción. Por otro lado, se determina la potencialidad de producción de biogás que tiene la fábrica considerando la norma potencial, el porcentaje de aprovechamiento de estas capacidades y el porcentaje de cachaza en caña. En caso de que la demanda de biogás sea mayor que el potencial de producción de biogás, el usuario debe reducir el número de consumidores. En caso contrario, se procede a calcular el volumen de digestión y con este el volumen de construcción del digestor.

Este volumen de construcción del digestor tiene que ser igual al volumen total considerando un número determinado de digestores. El algoritmo va buscando minimizar esta diferencia variando el diseño y el número de digestores a la vez que maximiza el valor presente neto de toda la instalación. Este proceso de optimización es llevado a cabo por un algoritmo genético simple diseñado para tal efecto.

Como quiera que los algoritmos de búsqueda estocástica por su naturaleza convergen a una solución cercana al óptimo global, se diseñó el procedimiento para que realizara

varias corridas y mostrara los resultados de cada una de ellas dando al decisor un conjunto de buenas soluciones para que decida cuál de ellas es la más conveniente para su implementación. El número de corridas es un parámetro que fija el usuario. Para este caso se realizan 5 corridas. El resultado de cada una de las variantes de diseño contiene el número de digestores necesarios y sus valores de diseño (radio básico, altura de la cúpula, altura de la pared, radio de cúpula, diámetro y altura del cono de base). También muestra el valor presente neto de cada variante.

El modelo se implementó en ambiente Matlab R2015a y la codificación del software desarrollado se muestra en el Anexo A.

2.7 Conclusiones Parciales

1- Se aplica con carácter novedoso un AG como técnica de búsqueda en el diseño de una planta de biogás para la cocción en comunidades cercanas a la fuente y que esté basada en biodigestores de cúpula fija. Un tratamiento similar no se reporta en la literatura consultada.

2- La optimización del error del volumen de digestión con relación al volumen total y del inverso del VAN se realiza para varias corridas, por lo que el método propuesto permite obtener un conjunto de soluciones cuasi-óptimas que permiten al usuario disponer de variantes para decidir finalmente cual es la más conveniente para él.

3- El cálculo de las áreas constructivas para determinar el costo de la inversión, es un aspecto novedoso ya que en la literatura especializada se reporta el cálculo del costo total en función del volumen del digestor. Este cálculo es utilizado por el AG para la maximización del VAN.

4- El método propuesto es una herramienta poderosa para el diseño óptimo de una planta de biogás que utiliza como sustrato la cachaza proveniente de los centrales

azucareros. Este modelo busca satisfacer requerimientos de cocción a la vez que lo hace con el diseño más económico posible para este tipo de construcciones.

5- En el modelo económico se determinaron los coeficientes que permiten estimar el costo de la inversión en etapas tempranas del desarrollo del proyecto.

Capítulo 3. Análisis de resultados

Este capítulo tiene como objetivo, describir la aplicación de la metodología para el diseño óptimo de una planta de biogás a partir de la cachaza. Fue seleccionado para el estudio de caso la UEB central Azucarero “Ciudad Caracas”.

Se realizan varias corridas con diferentes escenarios económicos para evaluar la sensibilidad del método ante variaciones de precios y otras variables. Los resultados obtenidos permiten dar a los decisores varias soluciones para seleccionar la más conveniente.

3.1 Caso de estudio.

La UEB Central Azucarero Ciudad Caracas se encuentra ubicada en el municipio de Lajas en la Provincia de Cienfuegos y pertenece a la Empresa Azucarera de Cienfuegos, del Grupo AZCUBA. Su tarea fundamental es producir azúcar crudo de alta calidad y alta Pol ensacada para exportación. Además, produce energía eléctrica renovable y otros derivados a partir de la biomasa cañera, con competitividad y sostenibilidad que satisfaga las necesidades del cliente y la elevación del nivel de vida de los trabajadores.

La norma potencial de molido es de 4 025 toneladas de caña en 24 horas. Tecnológicamente cuenta con 5 molinos modificados y remodelados en los años 95 - 96, dispuestos en un tándem totalmente accionado por motores eléctricos. El proceso de fabricación está totalmente compactado y el bloque energético dispone de una batería de 2 calderas para bagazo como combustible, una de 45 t/h y otra de 60 t/h y una planta eléctrica con 2 turbogeneradores de 4 MW. También cuenta con una planta de tratamiento para el agua de reposición a calderas.

Para realizar un análisis de las potencialidades de producción de cachaza de este central, se parte de la caña molida y del porcentaje de cachaza en caña (Anexo C). Si se considera que en esta zafra 2016 el porciento de aprovechamiento de la norma potencial diaria es de 74.4% (ver figura 3.1) con un porcentaje de cachaza en caña del 3.33% (ver figura 3.2), entonces se puede disponer de 99.72 t de cachaza diaria.

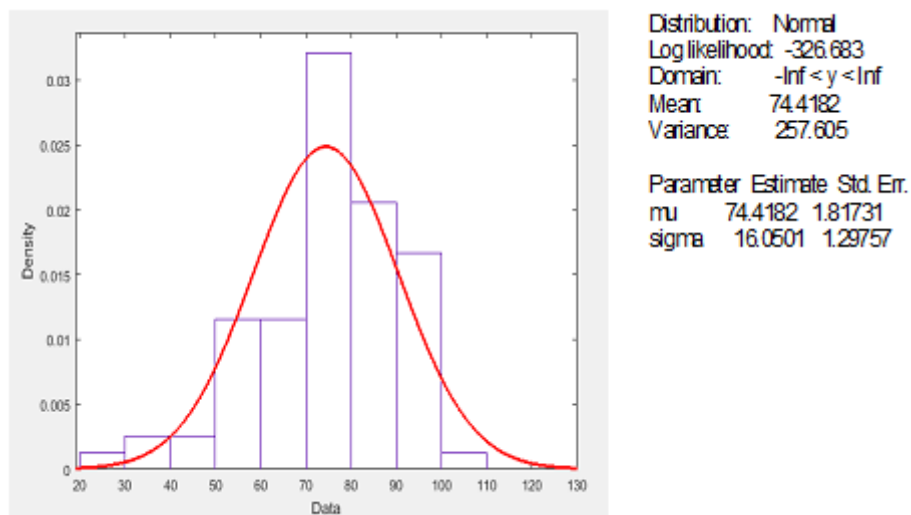


Figura 3.1. Ajuste de distribución normal de los datos de porcentaje de aprovechamiento de la norma potencial en el periodo enero-marzo de la zafra 2016.

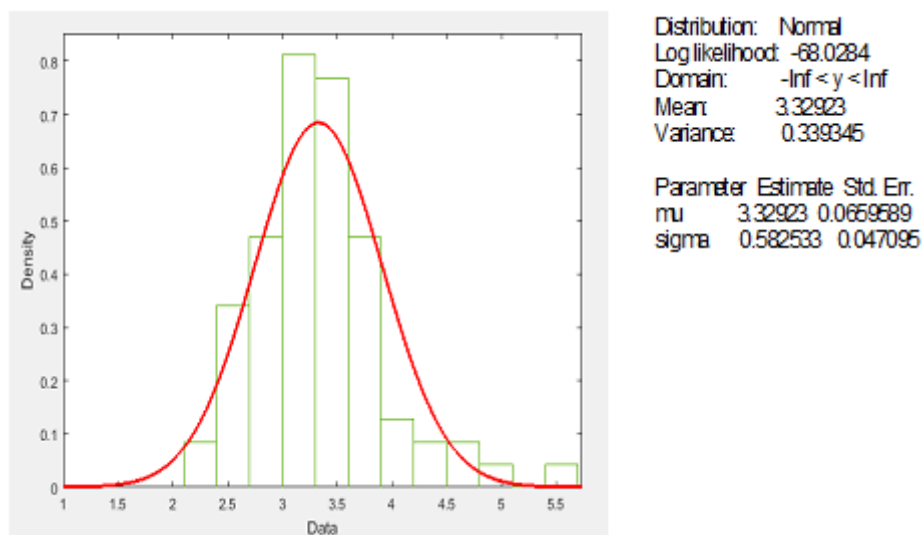


Figura 3.2. Ajuste de distribución normal de los datos de porcentaje de cachaza en caña del periodo enero-marzo de la zafra 2016.

Este volumen de cachaza disponible diariamente es una muestra del potencial de utilización que ofrece este recurso con enormes posibilidades de utilización en fertilización y en la producción de energía.

3.2 Disposición actual de la cachaza.

Actualmente la cachaza se lleva a un plato para su posterior dosificación como fertilizantes al suelo, pero esta aplicación presenta inconvenientes ya que su aplicación al área de cultivo no puede ser directa, por las características que presenta este abono orgánico salido del proceso. En la figura 3.3 se puede ver la instalación para extraer la cachaza del central. Esta es transportada por carretas hasta un plato para su posterior utilización en el campo. En la figura 3.4 se muestra una vista del plato donde se almacena la cachaza a la intemperie con alto riesgo de contaminación y auto ignición.



Figura 3.3 Vista de la instalación para extracción de la cachaza mediante carretas



Figura 3.4 Vista del plato de disposición de cachaza.

3.3 Información básica para el diseño

Como el objetivo es diseñar una planta de biogás para la cocción en el sector residencial y el comedor obrero de la fábrica, se parte de estas necesidades para el diseño. Aunque existen 385 núcleos familiares en el batey, se considerarán en una primera etapa los 100 núcleos más cercanos a la fábrica. Además, es necesario conocer los datos utilizados para el cálculo económico. Esta información se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Información básica para el diseño.

Información inicial para cálculo de combustible para necesidades de cocción	
Cantidad de comensales en comedor obrero	300
Núcleos familiares de la comunidad	100
Cantidad de personas por núcleo	4
Datos económicos	
Vida útil de la inversión (años)	20
Tasa de impuestos sobre la ganancia (%)	30
Tasa de interés bancario (%)	15
Coeficiente de gastos anuales como porcentaje de la inversión inicial (%)	5

Precio del biogás (\$/m ³)	0.5
Precio del bioabono (\$/t)*	270

*precio en la provincia de Sancti Spiritus (Barrera, 2007)

3.4 Influencia de la venta de bioabono.

El abono orgánico o bioabono es un fertilizante que proviene de animales, humanos, restos vegetales de alimentos, restos de cultivos de hongos comestibles u otra fuente orgánica y natural. Estos tienen una composición en dependencia del tipo de sustrato

Los Bioabonos producidos como residual de la producción de biogás tienen una composición media de 1,5 a 2.5% de N₂, 1.16-2.5% de P₄ y 0.7-0.9% de K por lo que pueden sustituir los diferentes tipos de agroquímicos utilizados actualmente en la agricultura que provocan daños irreversibles en ocasiones al medio de cultivo y su uso ha contribuido a lo largo del tiempo a la mejora de los suelos. También los efluentes de los digestores, pueden ser utilizados en la lombricultura para la fabricación de humus, abono orgánico con propiedades para los suelos superiores a las excretas húmedas, así como acuicultura. Por lo tanto, buscando la forma de hacer más rentable económicamente la inversión de esta planta, se hace el planteamiento del aprovechamiento en mayor medida de los lodos orgánicos generados en la digestión anaeróbica.

Hay estudios en los que no se tienen en cuenta los ingresos que reportan las ventas de bioabono (Barrera, 2007), aunque reconocen que muchos autores plantean que garantizan la rentabilidad de estas plantas. Estos bioabonos se producen en mayor escala en aquellas plantas que tratan residuos con altos contenidos de sólidos totales como es el caso que nos ocupa.

Como se explicó en el capítulo anterior, con este modelo se puede considerar la venta de bioabonos como un ingreso adicional. Este ingreso se calcula por la expresión 2.21

y depende de la capacidad de la planta y del precio al cual se comercializa este producto. Por la influencia que puede tener en la rentabilidad de la inversión, se diseña la planta considerando la venta de biogás solamente y la posibilidad de vender además el bioabono como un subproducto del proceso.

3.4.1 Biogás como única producción

Para considerar que la planta a diseñar solo se utilizará para la venta de biogás, se asigna en el modelo un valor nulo al precio del bioabono. Esto hace que los ingresos por este concepto sean cero y la optimización se base solamente en los ingresos por venta de biogás. Los resultados de la corrida para estas condiciones se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Variantes resultado de la corrida del modelo sin considerar la venta de bioabono.

Variantes	1	2	3	4	5
Volumen necesario de biogás para cocción (m ³)	245.67	245.67	245.67	245.67	245.67
Número de biodigestores	3	4	3	3	3
hc (m)	1.51	1.38	1.51	1.51	1.51
hp (m)	2.27	2.07	2.27	2.27	2.27
Rc (m)	3.78	3.45	3.78	3.78	3.78
D (m)	6.05	5.52	6.05	6.05	6.05
ht (m)	0.91	0.83	0.91	0.91	0.91
VT (m ³)	245.67	245.67	245.67	245.67	245.67
Vdigestor (m ³)	81.89	61.42	81.89	81.89	81.89
Valor presente neto (pesos)	36748.01	22888.30	36748.01	36748.01	36748.01
Superficie constructiva total (m ²)	320.79	355.77	320.79	320.79	320.79

Como puede observarse, para las condiciones propuestas, en las 5 variantes de diseño que da el algoritmo hay una elevada redundancia quedando realmente en dos variantes con 3 y 4 biodigestores respectivamente. Puede observarse que la variante con mayor rentabilidad es la de 3 biodigestores con un VAN de 36.7 MP. El diseñador puede

seleccionar la de 4 biodigestores más pequeños (de 61 m³), pero el VAN, aunque es positivo cae hasta 22.8 MP.

3.4.2 Considerando el bioabono como un subproducto.

Para incrementar la rentabilidad de la inversión puede venderse el bioabono a productores agrícolas del territorio. El precio estipulado para este producto es de 270 pesos/t. En la tabla 3.3 se muestran los resultados considerando la venta de bioabono.

Tabla 3.3 Variantes resultado de la corrida del modelo considerando la venta de bioabono.

Variantes	1	2	3	4	5
Volumen necesario de biogás para cocción (m ³)	245.67	245.67	245.67	245.67	245.67
Número de biodigestores	3	3	3	3	3
hc (m)	1.51	1.51	1.51	1.51	1.38
hp (m)	2.27	2.27	2.27	2.27	2.07
Rc (m)	3.78	3.78	3.78	3.78	3.45
D (m)	6.05	6.05	6.05	6.05	5.52
ht (m)	0.91	0.91	0.91	0.91	0.83
VT (m ³)	245.67	245.67	245.67	245.67	184.26
Vdigestor (m ³)	81.89	81.89	81.89	81.89	61.42
Valor presente neto (pesos)	1042794.65	1042794.65	1042794.65	1042794.65	1047667.99
Superficie constructiva total (m ²)	320.79	320.79	320.79	320.79	266.83

Puede observarse que la rentabilidad se eleva considerablemente hasta 1042 MP. Aunque se observa una gran repetitividad, dando todas las variantes 3 biodigestores, en el caso de la variante 5, el algoritmo converge a un mínimo local y la propuesta no llega a satisfacer la demanda de biogás.

Un esquema con las medidas fundamentales de los biodigestores para la variante de construir 3 de 82 m³ se muestra en la figura 3.5 y un esquema tecnológico simplificado del diseño de la planta en la figura 3.6.

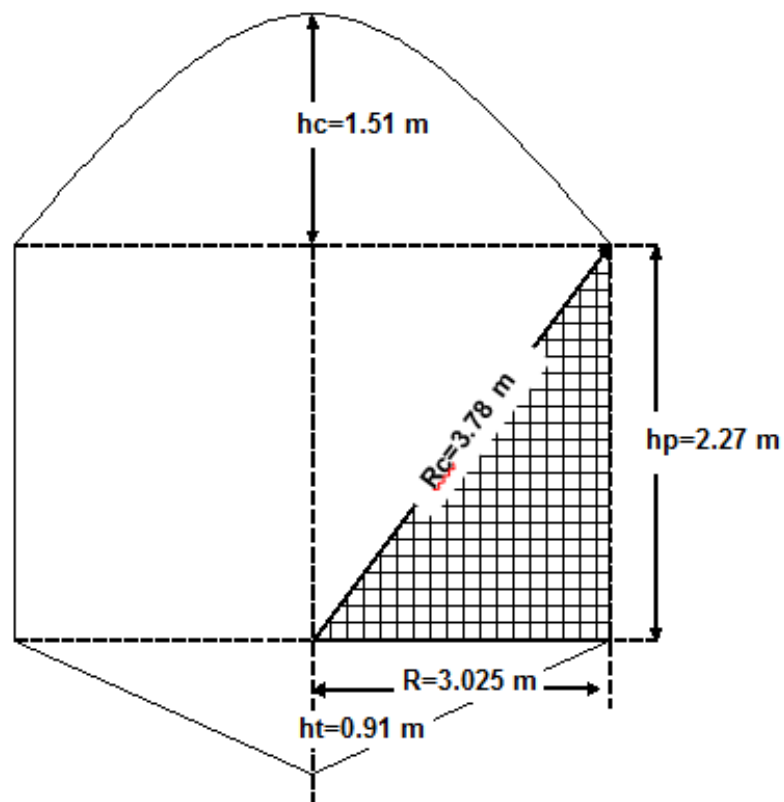


Figura 3.5. Dimensiones para el diseño optimizado con 3 biodigestores.

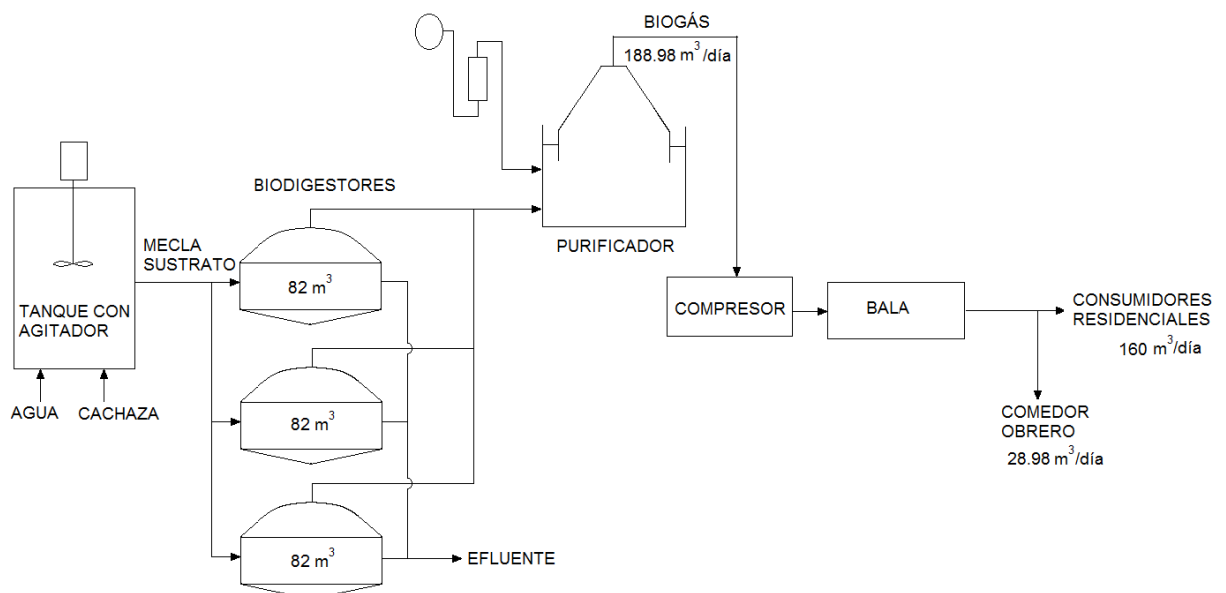


Figura 3.6. Esquema simplificado de la instalación

3.5 Análisis de sensibilidad

Debido a que el escenario económico puede variar afectando la rentabilidad del proyecto se realizaron varias corridas variando alguno de sus parámetros para ver el efecto sobre el valor presente neto de la inversión. Los resultados se muestran en las figuras 3.7 a la 3.10.

En la figura 3.7 se puede observar que la rentabilidad cae bruscamente para tiempos de vida útil por debajo de 15 años. Esto no es preocupante debido a este tipo de instalación normalmente tiene una vida útil de 20 años si se garantizan las acciones de mantenimiento adecuadas.

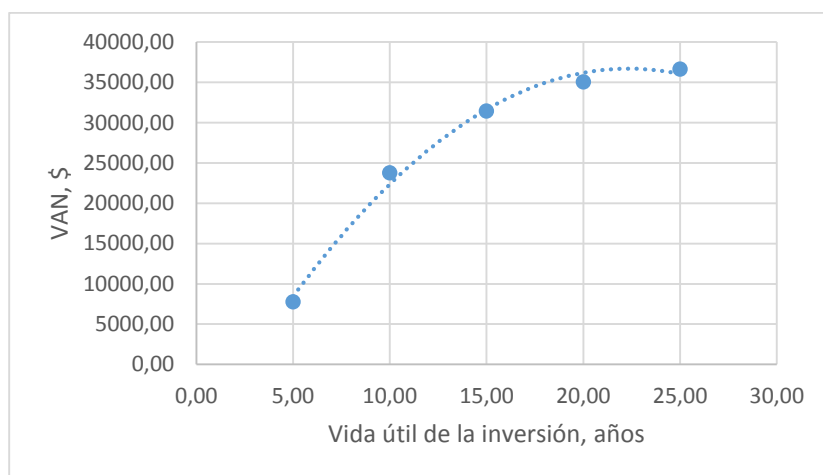


Figura 3.7. Rentabilidad vs vida útil de la inversión.

La tasa de impuestos considerada para el análisis económico es de un 30% pero se pudo comprobar que incluso considerando un 35% el VAN se mantiene en el orden de los 30 MP (ver figura 3.8). Un efecto similar al de la tasa de impuestos se observa con la tasa de descuento (figura 3.9).

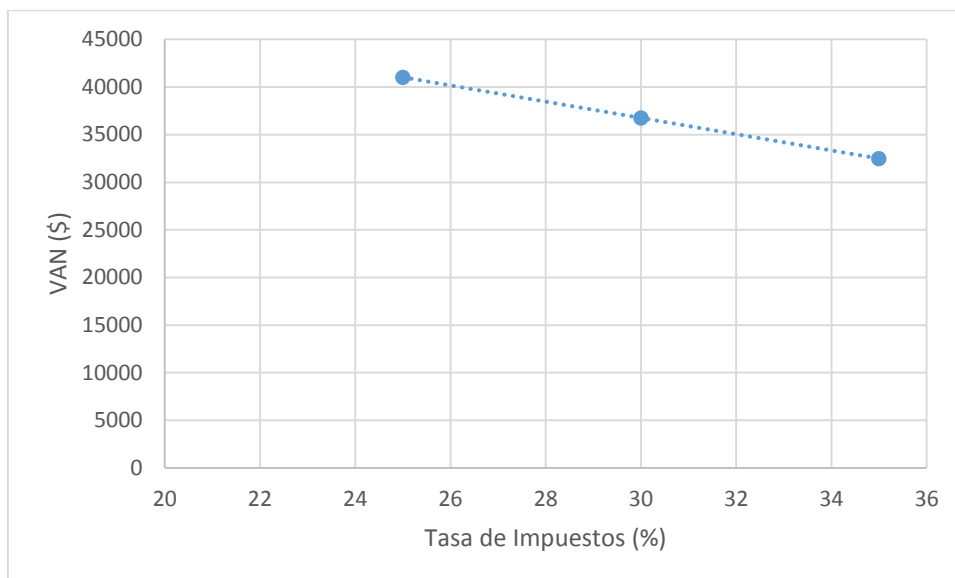


Figura 3.8. Rentabilidad vs tasa de impuestos sobre la ganancia

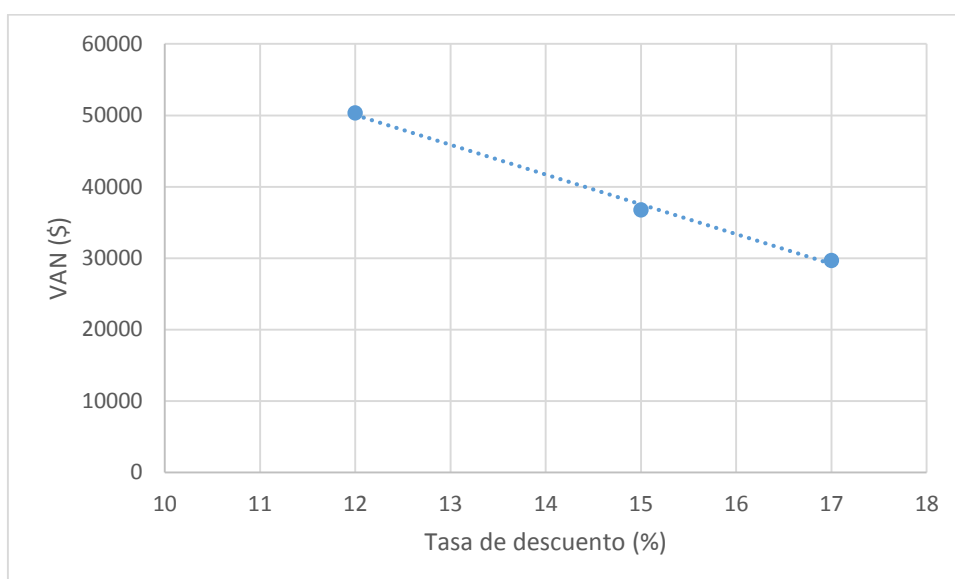


Figura 3.9. Rentabilidad vs tasa de descuento

En el epígrafe 3.2 se analizó la influencia de la venta de bioabono como subproducto y se mostró que se producía un incremento notable de las utilidades, sin embargo, debido a la volatilidad de los precios conviene ver la influencia que tiene variar el precio de venta del biogás.

Para hacer este análisis se consideró variaciones en el precio del biogás un 20% por encima y por debajo del utilizado para el caso base. Los resultados se muestran en la

figura 3.10 demostrando que aún en el escenario pesimista se mantiene la rentabilidad con un VAN de 21.8 MP.

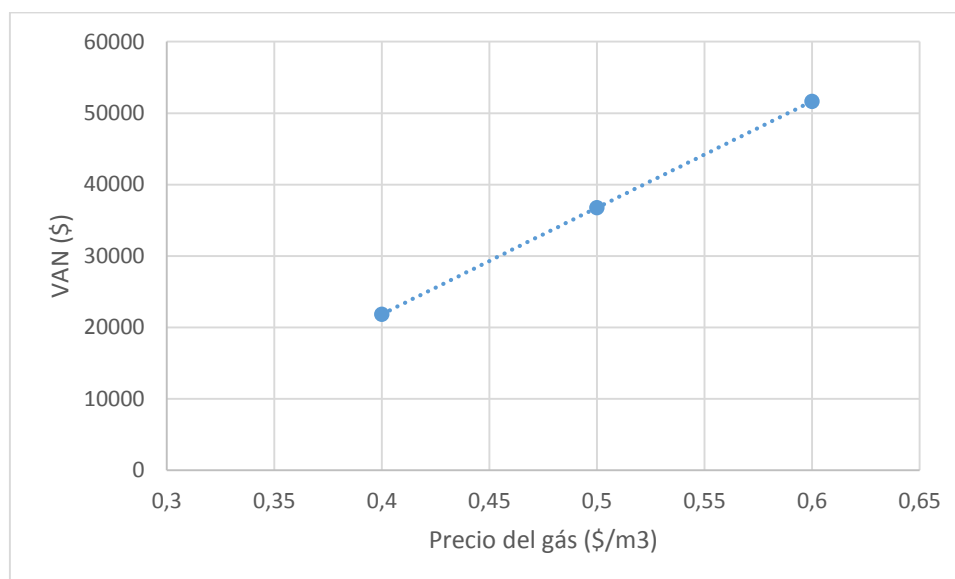


Figura 3.10. Rentabilidad vs precio del biogás

3.6 Análisis de sostenibilidad

Las fuentes de energía renovables ayudan a alcanzar los objetivos de sostenibilidad energética porque brindan beneficios como seguridad energética, mitigación de los gases de efecto invernadero, creación de puestos de trabajo, desarrollo rural y acceso a la energía. En este epígrafe se propone una adaptación de la metodología publicada por Juárez y Castro (Juárez & Castro, 2016) para analizar la sostenibilidad energética con indicadores en las dimensiones económica, social y ambiental para un biogás que suministra energía a un restaurante. Se construyen dos escenarios: un primer escenario (*Escenario base*) donde la energía final para cocción se obtiene de la electricidad para los núcleos residenciales y de biomasa forestal (leña) para el comedor obrero. El segundo escenario (*Escenario con biogás*) consiste en la instalación de la planta de biogás a partir de la cachaza y el biogás utilizado como combustible para la cocción en el comedor obrero y los núcleos familiares considerados.

Para ambos escenarios la demanda de energía para cocción se mantiene constante y se estima como 4912 MJ/día (considerando un valor calórico del biogás de 20 MJ/m³).

Los indicadores calculados son normalizados a valores entre 0 y 1 para facilitar la comparación entre los escenarios.

3.6.1 Indicadores de dimensión económica

- Costo de la energía de cocción (CEC) es el costo unitario de la energía final para cocción en \$/MJ y se calcula como:

$$CEC = \sum_i \left(LUC_i \cdot \frac{E_i}{TEDC} \right) \quad (3.1)$$

Donde:

LUC_i es el costo unitario nivelado en \$/MJ para el tipo de combustible i

E_i es la contribución de energía diaria para cocción del tipo de combustible i

$TEDC$ es la demanda de energía final diaria para cocción en MJ.

Este indicador se normaliza considerando que en los países en desarrollo un bajo costo de la energía se corresponde con un alto nivel de sostenibilidad energética ya que favorece el acceso a la energía. Como es difícil determinar el valor mínimo que debe considerarse para el costo de la energía se asume arbitrariamente como valor cero y uno un 30% por encima del mayor costo unitario y un 30% por debajo del menor costo unitario del escenario base respectivamente.

- Certidumbre sobre la disponibilidad de energía para cocción (CCEA) que está relacionado con la confiabilidad del suministro de energía y que se calcula como:

$$CCEA = \sum_i \left(C_i \cdot \frac{E_i}{TEDC} \right) \quad (3.2)$$

Donde:

C_i es la certidumbre de la disponibilidad del combustible i

Para el escenario base se asume que la certidumbre para la electricidad y la leña (C_e y C_l) son iguales a 1 (100%) ya que virtualmente el suministro de energía eléctrica se

mantiene sin afectaciones y el aseguramiento de la leña para el comedor obrero está garantizado y con reserva almacenada.

Con respecto al biogás, existen diferentes factores que influyen en la producción y composición del mismo y por lo tanto, la certidumbre de su disponibilidad se calcula como:

$$C_{biogas} = (1 - cv_{biogas}) \quad (3.3)$$

Siendo cv_{biogas} el coeficiente de variación de la producción de biogás que se calcula como la desviación estándar dividida por la media de la producción de biogás en un periodo de tiempo determinado. Dado que el escenario con biogás es un proyecto no ejecutado, no existen valores registrados de su producción y se asume de valores de producción de biogás reportados en la literatura y que ya están normalizados, $C_{biogas}=0.79$ (Juárez & Castro, 2016).

3.6.2 Indicadores de dimensión social

- Se utiliza el indicador de calidad del aire urbano (UAQ) ya que un aspecto fundamental en la dimensión social del efecto del uso de la energía está relacionado con la salud humana. Este indicador considera los siguientes contaminantes del aire: Monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos totales diferentes del metano (TNMO) y material particulado total (TSP). Las emisiones de cada uno de los contaminantes j se calculan como:

$$AP_j = \sum_j (EF_{ij} \cdot E_i) \quad (3.3)$$

Donde:

EF_{ij} es el factor de emisiones del contaminante j para el combustible i en g/MJ

El criterio para normalizar estos valores es el siguiente: Uno es igual a emisiones nulas, mientras que cero se corresponde con las emisiones calculadas para los mayores factores de emisión reportados por (Smith, y otros, 2000). Estos factores son: 10.7

g/MJ para el CO (para el carbón vegetal), 2.694 g/MJ para TNMO (para el estiércol animal) y 1.187 g/MJ para el TSP (para la paja de arroz).

- El segundo indicador de dimensión social es la independencia energética (*EI*) que se relaciona con la parte de la energía final para cocción que no es cubierta por una fuente externa. Hay varios criterios para evaluar este aspecto. Algunos autores lo consideran desde un punto de vista económico como los ahorros que se obtienen por sustituir combustible fósil por biogás (Nzila, y otros, 2012). Sin embargo, la noción que da Juárez (Juárez & Castro, 2016) es más compatible con el concepto de desarrollo local ya que considera la energía que es producida por medios propios. Desde la comunidad, la electricidad representa una energía externa, ya que es generada en plantas térmicas con combustible fósil importado. El biogás es producido por residuos de la fábrica próxima a la comunidad. Este indicador se calcula como:

$$EI = \frac{E_i}{TEDC} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Este indicador es normalizado directamente.

- Otro indicador para esta dimensión es la energía útil para cocción (*UEC*) que mide la energía útil para cocción por persona beneficiada. Este indicador depende de la eficiencia del proceso de conversión de la energía y tiene en cuenta la parte de la energía que se traslada al bienestar social. Se calcula como:

$$UEC = \frac{\sum_i (\eta_i \cdot E_i)}{personas} \quad (3.5)$$

Donde:

personas es el número de personas beneficiadas con el proyecto.

η_i es la eficiencia en la conversión. La eficiencia térmica para diferentes opciones tecnológicas se muestra en la Tabla 3.4.

Tecnología de cocción	Eficiencia (%)
Leña*	5 -17
Electricidad**	80
Biogás**	57.3

* (Dutt, Navia, & Sheinbaum, 1989)

** (Smith, y otros, 2000)

El criterio para la normalización es valor cero para la eficiencia más baja reportada por Smith igual a 8.2% y valor uno para la más alta 80% para la electricidad (Smith, y otros, 2000).

3.6.3 Indicadores de dimensión ambiental

- Intensidad de carbono (CI) es un indicador que cuantifica las emisiones promedio de CO₂ derivadas del consumo de combustible para cocción. Se calcula como:

$$CI = \frac{\sum_i CO_2 EF_i \cdot E_i}{personas} \quad (3.6)$$

Donde:

$CO_2 EF_i$ es el factor de emisión de CO₂ del combustible i utilizado para cocción en gCO₂/MJ

Se asume que la combustión del biogás es neutra en CO₂. Como el biogás procede de biomasa cuya restitución, suponiendo que ocurre de manera sostenible, implica la absorción de CO₂ en la misma cantidad que libera en su combustión (Juárez & Castro, 2016). La normalización fue llevada a cabo igualando uno a CI = 0 t CO₂/persona y cero a un CI calculado considerando las emisiones con electricidad que son las mayores emisiones para el escenario base.

Otro indicador propuesto que se relaciona con el efecto directo sobre los gases de efecto invernadero (GHG) es el llamado mitigación del calentamiento global (GWM).

Para el escenario base se calcula como:

$$GHG_E = \sum_i (\sum_j EF_{ij} \cdot E_i \cdot GWP_j) \quad (3.7)$$

Donde:

EF_{ij} es el factor de emisiones del GHG j para el combustible i en g/MJ (Tabla 3.5)

GWP_j es el potencial de calentamiento global del GHG j ($CO_2=1$, $CH_4=25$, $N_2O=298$)

Tabla 3.5. Factores de emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O para el biogás	
	Biogás, g/MJ
CO_2	81.5
CH_4	0.0567
N_2O	0.00536

La reducción de emisiones del escenario con biogás con relación al escenario base se determina como:

$$GWM = \frac{GHG_{biogas} - GHG_{base}}{GHG_{base}} \cdot 100 \quad (3.8)$$

Este indicador queda normalizado directamente.

- Otro indicador utilizado es el denominado gestión de residuos sólidos (SWM) que cuantifica la fracción de residuos sólidos que es tratado en la planta de biogás antes de su disposición final. Aunque esto no está explícitamente relacionado con la sostenibilidad energética, es relevante para el desarrollo sostenible debido a los problemas de salud y medioambientales que se derivan de una inadecuada recolección, tratamiento y disposición de los residuos (Juárez & Castro, 2016). Este indicador se determina como:

$$SWM = \frac{SW_{tratados}}{SW_{total}} \cdot 100 \quad (3.9)$$

Donde:

$SW_{tratados}$ se refiere a la cantidad de cachaza diaria utilizada para alimentar la planta de biogás, en t.

SW_{total} es la cantidad de cachaza diaria que se produce en el central, en t. Para este caso es de 99.72 t.

Este indicador queda normalizado directamente.

3.6.4 Sostenibilidad energética

Los cálculos de los indicadores de sostenibilidad energética se muestran en el Anexo D y los resultados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Indicadores de sostenibilidad energética.

	Indicador	Escenario base		Escenario con biogás	
		Valor	Valor normalizado	Valor	Valor normalizado
Dimensión económica	Costo de la energía para cocción (CEC)	0.016 \$/MJ	0.57	0.025 \$/MJ	0.26
	Certidumbre sobre la disponibilidad de energía para cocción (CCEA)	1	1	0.79	0.79
	Calidad del aire urbano (UAQ)		0.88		0.98
Dimensión social	Emisiones de CO	$1.99 \cdot 10^{-3}$ t/día	0.95	$0.5 \cdot 10^{-3}$ t/día	0.99
	Emisiones de TNMOC	$0.109 \cdot 10^{-3}$ t/día	0.99	$0.147 \cdot 10^{-3}$ t/día	0.99
	Emisiones de TSP	$1.56 \cdot 10^{-3}$ t/día	0.69	$0.135 \cdot 10^{-3}$	0.97
	Independencia energética (EI)	0.0%	0	100%	1
	Energía útil para cocción (UEC)	3.09 MJ/persona	0.59	3.74 MJ/persona	0.68
Dimensión ambiental	Intensidad de carbono (CI)	0.00105 tCO ₂ /persona	0.16	0	1
	Mitigación del calentamiento global (GWM)	0.0%	0	39.5%	0.39
	Gestión de residuos sólidos (SWM)	0.0%	0	1.57%	0.016

El promedio de los indicadores de la dimensión económica es 0.785 para el escenario base y 0.525 para el biogás. Este resultado se debe a que en el escenario base una parte de la energía se obtiene de la leña con un costo muy bajo ($LUC=0.005$ \$/MJ) además de que la certidumbre de disponibilidad del biogás es más baja ($CEC=0.79$). Estos resultados indican que el proyecto de cocción con biogás no impacta positivamente en la dimensión económica.

En la dimensión social, los indicadores promediaron 0.49 para el escenario base con un incremento significativo para el escenario con biogás que alcanza 0.88. El indicador calidad del aire urbano, aunque muestra que hay un ligero incremento de las emisiones de otros compuestos diferentes del metano (TNMOC) para el escenario con biogás, hay reducciones considerables de las emisiones de CO y TSP. La mejora en el indicador EI significa que la parte de la comunidad que se beneficiaría con el proyecto dispone de una fuente de energía local que la hace independiente de fuentes externas. El indicador EI y el CCEA pudieran parecer contradictorios ya que ambos se relacionan con la disponibilidad, pero es que el primero considera las posibles interrupciones que se pueden originar en la planta de biogás frente a la alta fiabilidad de las redes eléctricas y al suministro seguro de leña al comedor por parte de la forestal. No obstante, desde un punto de vista de desarrollo local, es importante disponer de recursos energéticos a partir de residuos que se originan dentro del ámbito de la comunidad. Con respecto al UEC la diferencia entre las eficiencias de la cocción con biogás y la cocción con leña en el comedor hacen que este indicador sea superior en el escenario que se propone.

El mayor impacto es en la dimensión ambiental, que para el escenario base los indicadores promedian 0.053 mientras que para el biogás es 0.46. El menor cambio se observa en la gestión de residuos sólidos, ya que la cachaza que se trata por digestión

anaerobia es una cantidad aún muy pequeña comparada con la que se produce diariamente y que es depositada directamente al medio. No obstante, hay reducciones notables en las emisiones de CO₂ debido fundamentalmente a que se considera una tecnología neutra en emisiones de CO₂. También contribuye positivamente a la mitigación del calentamiento global con una reducción en de los GHG desde 0.74 t CO₂e para el escenario base hasta 0.45 t CO₂e para el caso del biogás.

De manera general el promedio de todos los indicadores de sostenibilidad para el escenario base es de 0.4 mientras que con la propuesta de cocción con biogás a partir de la cachaza es de 0.64. Este resultado puede apreciarse mejor gráficamente en la figura 3.11 donde se observa que el área formada por los indicadores normalizados para el escenario base es menor que el área formada para los indicadores normalizados del escenario con biogás lo que indica un mayor nivel de sostenibilidad energética de esta propuesta.

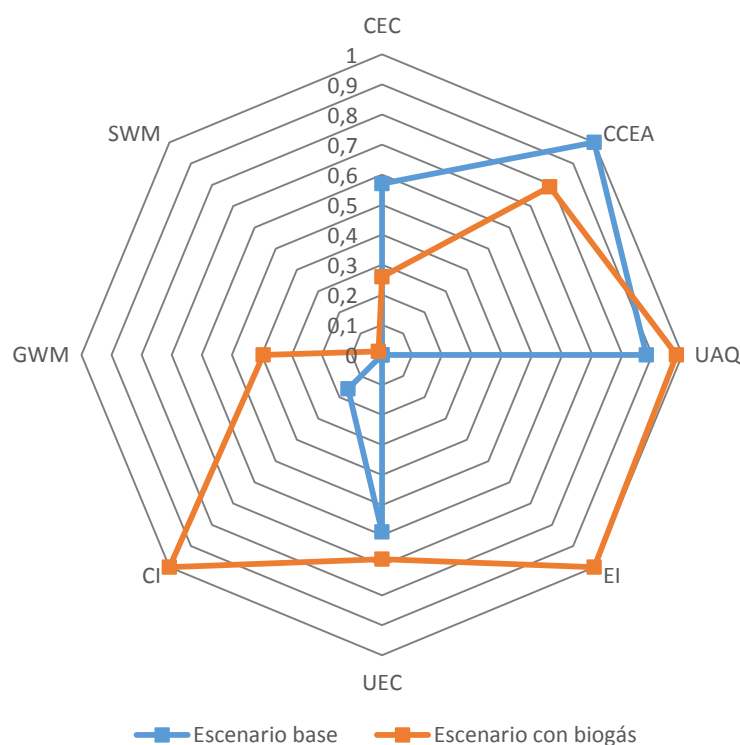


Figura 3.11. Gráfico radial de los indicadores de sostenibilidad energética para cada escenario

3.7 Conclusiones parciales.

- 1- Entre los resultados de diferentes corridas del AG la mejor variante desde el punto de vista económico es la que propone la construcción de 3 biodigestores de 82 m³ cada uno. Con esta solución se puede abastecer las necesidades de cocción para 100 núcleos familiares cercanos a la planta y al comedor obrero.
- 2- Si se considera la venta del efluente como bioabono a un precio de 270 \$/t, el valor presente neto se eleva de 36.7 MP a 1042 MP.
- 3- El análisis de sensibilidad de la rentabilidad del proyecto con relación a posibles variaciones en los datos económicos considerados muestra que aún en el escenario más pesimista se mantiene el VAN por encima de los 20 MP.
- 4- Se proponen indicadores de sostenibilidad energética a partir de modificaciones a indicadores reportados en la literatura y que son aplicados por primera vez a las condiciones de Cuba.
- 5- El promedio de los indicadores de sostenibilidad para el escenario base es de 0.4 mientras que para el biogás es de 0.64 por lo que el proyecto de cocción con biogás resulta mejor desde el punto de vista de sostenibilidad energética que el denominado escenario base que emplea electricidad para el sector residencial y leña para el comedor obrero del central.

CONCLUSIONES

1-El biogás es una de las alternativas actuales para la diversificación de la industria azucarera cubana contribuyendo a la rentabilidad de la empresa y al desarrollo sostenible de comunidades rurales.

2-No se reporta en la literatura consultada ningún procedimiento para la optimización del diseño de plantas de biogás a partir de residuales sólidos de la industria y específicamente que empleen cachaza como sustrato.

3- Se diseñó un algoritmo genético simple para la selección del número óptimo de biodigestores de cúpula fija y el cálculo de sus dimensiones de manera que se satisfagan las necesidades de cocción de la comunidad y se maximice el valor presente neto de la inversión.

4-Para el caso de estudio analizado, la mejor variante es la que emplea 3 biodigestores de 82 m³ cada uno. Con esta solución se puede abastecer las necesidades de cocción para 100 núcleos familiares cercanos a la planta y al comedor obrero que cocina para 300 comensales diariamente.

5- La inversión propuesta es rentable, aunque no se considere la venta del bioabono resultante del tratamiento anaerobio del sustrato con un VAN del orden de 35 MP.

6- Se realizó un análisis de sostenibilidad para la opción de cocinar con biogás a partir de la cachaza dando como resultado que los indicadores de sostenibilidad para el escenario base promediados dan un valor de 0.4 mientras que para el biogás es 0.64, por lo que el proyecto de cocción con biogás es más sostenible energéticamente que el denominado escenario base que emplea electricidad para el sector residencial y leña para el comedor obrero del central.

RECOMENDACIONES

Como continuidad de esta investigación se recomienda:

- 1- Realizar un análisis similar desarrollando modelos para el diseño óptimo de plantas que empleen otras tecnologías como biodigestores del tipo UASB, Híbridos y otros modelos comerciales a escala industrial.
- 2- Incluir otros servicios energéticos en el análisis como son la generación de electricidad y el uso de biogás como combustible para el transporte automotor.

Bibliografía

- Barra, O. A., & Szockolay, S. (1988). *Basic course of renewable energy sources*. Rome.
- Barrera, E. L. (2007). *Propuestas tecnológicas para producir biogás con fines energéticos. Un estudio de caso en la granja Remberto Abad Alemán*. (Tesis de Maestría), Universidad de Cienfuegos, Centro de Estudios de
- Botero, R., & Preston, T. R. (1987). *Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizantes a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización*.
- BP. (15 de Junio de 2013). *BP Statistical Review of World Energy*. Recuperado a partir de: Comisión nacional de energía. (1993). *Programa de desarrollo de las fuentes nacionales de energía*. La Habana.
- Cuba energía. (17 de Marzo de 2015). Residuos Milagrosos. *Juventud Rebelde*. La Habana
- Cuesta, J. M., Martín, F., Vicente, G., & Villar, S. (2008). *Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento*. Madrid.
- Dutt, G., Navia, J., & Sheinbaum, C. (1989). Cherañátzicurin: tecnología apropiada para cocinar con leña. *Ciencias*(15), 43-47.
- Energía y Medio Ambiente, (s.f) Cienfuegos.
- Estévez, P. (Agosto de 1997). Optimización mediante algoritmos genéticos. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*, 93-92.
- Filippín, C., Follario, J., & Vigil, J. (2012). *Diseño de un biodigestor para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de vacas lecheras en la facultad de agronomía de la Universidad nacional de La Pampa*.
- Fonte, A., & Tabla, Y. (1999). Generación de biogás a partir de cachazas con diferentes características. *Tecnología Química*, 19(1), 10-17.
- Guardado, J. A. (2007). *Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas*. La Habana: CUBASOLAR.
- Hermida, O., & López, L. (2006). Diseño y evaluación de un biodigestor para obtener gas metano y biofertilizante a partir de la fermentación de cachaza y residuos agropecuarios. *Tercer Taller Nacional de Energía Renovables*.
<http://www.bp.com/statisticalreview>.
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo04>.

- Hwang, K., Shin, E., & Choi, H. (1997). A mechanical pretreatment of waste activated sludge for improvement of anaerobic digestion system. *Water Science and Technology*, 36(12), 111 - 116.
- ICIDCA-GEPLACEA-PNUD. . (1990). *Manual de los derivados de la caña de azúcar*. (2da ed.).
- Jerger, D. E., Dolenc, D., & Chynoweth, D. P. (1983). Biogasification of woody biomass following physical and chemical pretreatment.
- Juárez, S., & Castro, A. (enero-marzo de 2016). Assessing the impact of biogas on the energy sustainability of an urban restaurant in Mexico. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 17(1), 61-71.
- López, T. M. (2000.). *Procedimiento de pretratamiento para mejorar la digestión anaerobia de residuos sólidos*.
- Lugones, B. (2012). *Análisis de biodigestores en Cuba*. Recuperado a partir de:
- Nzila, C., Dewulf, J., Spanjers, H., Tuigong, D., Kiriamiti, H., & Van-Langenhove, H. (2012). Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya. *Applied Energy*, 93, 496-506.
- Obaya, M. (Junio, 2004). Tratamiento combinado de las vinazas de destilería y residuales azucareros en reactores UASB. *Revista Tecnología del agua*, (249) 78-85.
- Peters, M.S., & Timmerhous, K. (1970). Capítulo 4. Cost estimation. En *Plant desing and economical for chemical engineers* (pp. 90-156). La Habana: Ediciones Revolucionarias. Instituto del Libro.
- Pinnekamp, J. (1989). Effects of thermal pretreatment of sewage sludge on anaerobic digestion. *Water Science and Technology*(21), 97-108.
- Restrepo, H. F., Peña, C. A., & Pérez, A. (Segundo semestre de 2000). Hacia el desarrollo de nuevas máquinas computacionales: lecciones que aprendemos de la naturaleza. *Energía y Computación*, IX(2).
- Rosas, J. I., García, L. M., Rivero, J., Delgado, A. I., & Placeres, O. A. (Enero - Marzo de 2011). Potencialidades del empleo de la cachaza en la empresa azucarera 30 de noviembre para la obtención de biogás. *Avances*, 13(1).
- Salazar, I., Mockey, I. O., & Canal, M. (Septiembre-Diciembre de 2010). Estimado de la reducción de la emisión de CO2 por acción de ahorro de electricidad en las condiciones de Cuba. *Ingeniería Energética* , XXXI(3), 1-5.
- Sánchez, J. V. (2005). *Introducción a la producción de Biogás*. Centro Cristiano de Reflexión y diálogo.
- Smith, K., Uma, R., Kishore, V., Lata, K., Joshi, V., Zhang, J., . . . Khalil, M. (2000). *Greenhouse gases from small scale combustion devises in developing countries*. Phase IIa. US Enviromental Protección Agency. Recuperado a partir de:
<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1009BSZ.PDF?Dockey=P1009BSZ.PDF>

- Torres, M., Villa, P. M., Montalvo, S. J., & Escobedo, R. (2012). *Incidencia del pretratamiento de residuos sólidos en la flora microbiana de reactores anaerobios.*
- Zamora, L., Cisneros, Y., Macías, I., & López, A. (2012). *Consideraciones sobre la utilización del biogás. Metodología para la construcción de una pequeña planta de biogás.*
Recuperado a partir de: www.monografias.com/trabajos15/utilizacion-biogas/utilizacion-biogas.shtml.
- Zhang, J., Smith, K., Ma, Y., Ye, S., Jiang, F., Qi, W., Thorneloe, S. (2000). Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: A database for emission factors. *Atmospheric Environment*, 34(26), 4537-4549.

ANEXOS

Anexo A. Estimación del factor de construcción y montaje para el cálculo de la inversión inicial

La estimación de costo de plantas semejantes con diferentes capacidades puede hacerse mediante la conocida regla del 0,6 que plantea:

$$C_2 = C_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^m \quad (A.1)$$

Donde:

C_1 es el costo de la planta original

C_2 es el costo de la nueva planta

Q_1 es la capacidad de la planta original

Q_2 es la capacidad de la planta nueva

m es el factor de capacidad que si no se conoce se puede usar $m=0.6$, pero se puede estimar conociendo valores de plantas semejantes de diferentes capacidades.

Para estimar el valor de m para plantas de biogás con biodigestores de cúpula fija se emplean valores dados por Guardado. Para biodigestores de cúpula fija del tipo Nicarao con costos referenciados a 1996 se tiene:

$Q_1=42 \text{ m}^3$ y $C_1= \$ 4019.50$

$Q_2=24 \text{ m}^3$ y $C_2= \$ 2651.00$

De acuerdo a la expresión A.1 se puede plantear que:

$$m = \frac{\ln\left(\frac{C_2}{C_1}\right)}{\ln\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{2651.00}{4019.50}\right)}{\ln\left(\frac{24}{42}\right)} = 0.74$$

Conociendo que $m=0.74$ y tomando como planta original el biodigestor de 42 m^3 se estima el costo de la planta nueva de 189 m^3 que se propone para Ciudad Caracas mediante A.1, como:

$$C_2 = C_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^m = 4019.50 \left(\frac{189}{42} \right)^{0.74} = \$ 12\,233.00$$

Ahora bien, este costo es basado en el año 1996 por lo que hay que actualizarlo al 2016 según el índice de Costos de Chemical Engineers .

Para el año 1996 se conoce que $CE_{1996}=382$

Para el año 2016 se estima $CE_{2016}=809$. Este estimado se realiza a partir de la línea de ajuste exponencial de esos índices conocidos desde el 1963 hasta el 2008 (ver figura A1)

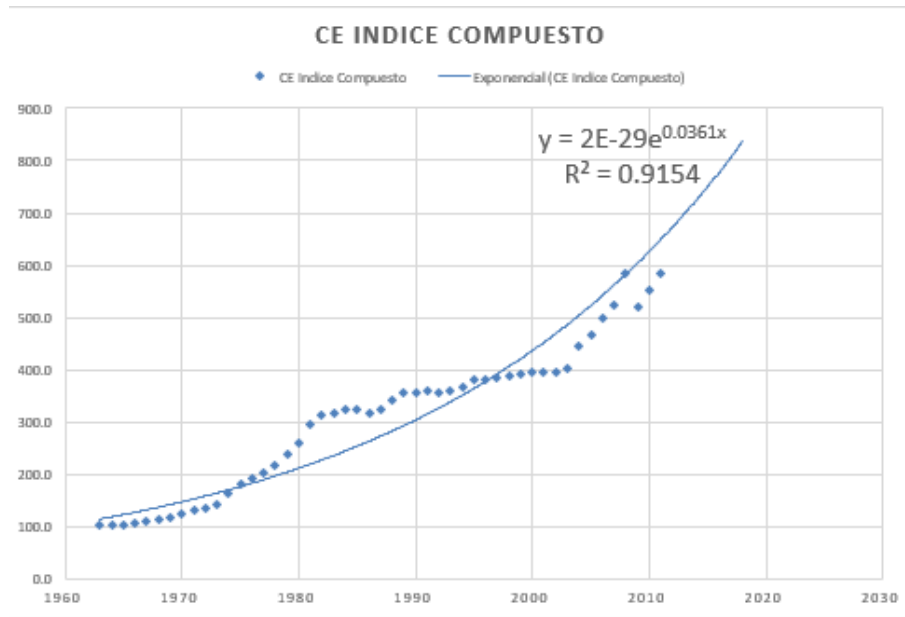


Figura A1. Índice compuesto para la actualización de los estimados de costo

El costo actualizado para el año 2016 se calcula como:

$$C_{2016} = C_{1996} \frac{CE_{2016}}{CE_{1996}} = 12\,233 \frac{809}{382} = \$ 25\,907.00$$

Ahora bien, como se conoce a partir de las corridas que el costo de materiales para la planta nueva es del orden de 23 500 se tiene que el factor que considera costos de construcción y montaje se puede calcular como:

$$C_{2016} = (\text{materiales})K$$

O sea que:

$$K = \frac{C_{2016}}{(\text{materiales})} = \frac{25907.00}{23500.00} = 1.10$$

Este factor es el que se utiliza en la ecuación (2.22) para calcular el costo de la inversión en el algoritmo genético propuesto.

Anexo B. Codificación en Matlab del algoritmo utilizado

```
%PROGRAMA PARA CALCULO DE ALTERNATIVAS DE BIODIGESTORES A PARTIR DE LA
%CACHAZA
clc
global N Vcd hmax hmin dmax dmin t De gi P_gas Vol_coccion T P_bio Cachaza
VPN
global N Vcd numero hc hp Rc D ht VT P_Cemento P_Arena P_Gravilla P_Bloque15
P_Ladrillo P_Cabilla
%DATOS DE ENTRADA
Ct=input('Comensales en comedor industrial, Ct=');
Nuc=input('Núcleos familiares en la población, Nuc=');
Nump=input('Numero de personas estimadas por núcleo familiar, Nump=');
%Demanda de biogás para cocción
%para comedores industriales
V1=7.08+0.073*Ct;
%para uso doméstico
V2=0.4*Nump*Nuc;
%Demanda total para cocción
Vol_cocción=V1+V2;
%%Cálculos para el dimensionamiento de una instalación de biogás.
PCC=input('Porcentaje de cachaza en caña en %, PCC=');
NP=input('Norma de molida potencial e t/día, NP=');
Aprov=input('Aprovechamiento de la norma potencial de molida en %, Aprov=');
Molida=(Aprov/100)*NP; %Caña molida diaria
Prod_Cachaza=Molida*PCC/100; %Producción de cachaza sólida diaria en t
%Potencial de generación de biogás considerando 120 m3/t de cachaza
Biogas_potencial=Prod_Cachaza*120;
%Como la demanda es menor que el potencial de generación
Cachaza=Vol_coccion/120;
%Para cachaza la Proporción cachaza agua es 1:3 y el Tiempo de retención=30
día
%Cálculo del Volumen de digestión Vd en m3
rho_mezcla=1000; %densidad de mezcla cachaza-agua en kg/m3
Vd = ((Cachaza + 3*Cachaza)*1000*30 )/rho_mezcla;
%Cálculo del volumen de construcción del digestor Vcd en m3
Vcd = 1.3*Vd;
%Número de variantes racionales N
N=5;
%%*****
%DATOS ECONÓMICOS
%*****
%Los valores de precios unitarios son vectores cuyo primer elemento es el
%correspondiente a USD y el segundo elemento a MN.
P_Cemento=3.58; % $/bolsa
P_Arena=3.35; % $/m^3
P_Gravilla=12.26; % $/m^3
P_Bloque15=1.072; % $/u
P_Ladrillo=0.72; % $/u
P_Cabilla=625; % $/t
%Vida útil de la inversión en años
T=20;
%Tasa de impuestos sobre la ganancia en %
t=30;
%Tasa de descuento (igual al interés bancario) en %
De=15;
%Coeficiente de gastos anuales se consideran como un 5% de los costos de
inversión
```

```

gi=0.05;
%Precio del m3 de gas para cocci3n en $/m3
P_gas=0.50;
%Precio del bioabono en $/t
P_bio=0;

AG;

%PROGRAMA PARA CORRIDA DE ALGORITMOS GENÉTICOS.
%Generar poblaci3n inicial (matriz B).
tic;
global N Vcd numero hc hp Rc D ht VT Vdigestor P_Cemento P_Arena P_Gravilla
P_Bloque15 P_Ladrillo P_Cabilla
global Ko hmax hmin dmax Y Dimensiones VPN error A_Total
Y=[];numero=[];Dimensiones=[];
for k=1:N
Npob=1000;
fprintf('    ESPERE CORRIDA DEL ALGORITMO GENETICO    %10.2f\n');
Mut=1/Npob;
lb=[1;1];
ub=[10;Inf];
options1=gaoptimset('Generations',Inf,'StallTimeLimit',120,'PopulationSize',N
pob,'EliteCount',2,'CrossoverFraction',0.8,'MutationFcn',{@mutationuniform,
Mut},'CrossoverFcn',{@crossoverheuristic,1.5},'PlotFcns',{@gaplotbestf,@gaplo
tbestindiv});
Y(:,k)=ga(@Biodigestor,2,options1);
Dimensiones(:,k)=[Vcd numero hc hp Rc D ht VT Vdigestor VPN error A_Total
Ko];
% Dimensiones(:,k)=[Vcd numero Y(4,:) Y(3,:) Rc 2*(Y(2,:)) Y(5,:) VT
Vdigestor VPN error A_Total Ko];
end
Resultado=[round(Y(1,:));Y(2,:)]
DIMENSIONES=Dimensiones

function error= Biodigestor( x )
global N Vcd numero hc hp Rc D ht VT Vdigestor P_Cemento P_Arena P_Gravilla
P_Bloque15 P_Ladrillo P_Cabilla
global Ko t De gi Vol_coccion T P_bio Cachaza P_gas VPN error A_Total
if x(1)>=1 && x(2)>0
    numero=round(x(1));
%        Vdigestor=x(2)^3*pi*1.121;
    U=x(2)/4;
    hc=2*U;
    hp=3*U;
    Rc=5*U;
    D=2*x(2);
    ht=0.15*D;
    V1=x(2)^2*hp*pi;
    V2=hc^2*pi*(Rc*hc/3);
    V3=x(2)*pi*ht/3;
    Vdigestor=V1+V2+V3;
    if Vdigestor <=100
        VT=numero*Vdigestor;

        A_cuerpo=numero*(2*pi*(x(2))*hp); %Area del cuerpo
        A_cono=numero*(pi*(x(2))*sqrt(ht^2+(x(2))^2)); %Area del cono
inferior
        A_domo=numero*2*pi*Rc^2*(1-sin(atan((x(2))/Rc))); %Area del domo

```

```

A_Total=A_cuerpo+A_cono+A_domo;

% % COSTO DE INVERSIÓN INICIAL
Cemento=P_Cemento*(0.3*(A_cuerpo+A_domo)+A_cono+10*(0.15*0.15*2*pi*D/2));
Arena=P_Arena*(0.1*(A_cuerpo+A_domo)+0.033*A_cono+0.3*(0.15*0.15*2*pi*D/2));
Gravilla=P_Gravilla*(0.05*A_cono+0.5*0.15*0.15*2*pi*D/2);
Bloque15=P_Bloque15*(13*A_cuerpo);%ok
Ladrillo=P_Ladrillo*(30*A_domo);%ok
Cabilla=P_Cabilla*(8*A_cono+4*2*pi*D/2)*0.675e-3;% 8 m/m2 de placa con
0.675kg/m para cabila de 1/2

Compresor=7000;
COSTO_MATERIALES=1.55*(Cemento+Arena+Gravilla+Bloque15+Ladrillo+Cabilla);

%Costo total de inversión se considera un factor de 1.10 para construcción
%y montaje
Ko=((número*COSTO_MATERIALES)+Compresor)*1.10;
%*****
%FLUJOS DE CAJA ANUALES
%*****
%Ingresos anuales por venta de gas
Ii_gas=(Vol_coccion*30*6*P_gas);
%Ingresos anuales por bioabono
Ii_bio=(Cachaza+3*Cachaza)*0.75*30*6*P_bio;
%Ingresos anuales totales
Ii=Ii_gas+Ii_bio;
%Gastos anuales
Gi=gi*Ko;
%Depreciación
Dep=Ko/T;
%Flujo de caja anual
Fci=(Ii-Gi-Dep)*(1-t/100)+Dep;
%*****
%CALCULO DEL VALOR PRESENTE NETO
%*****
Year=1:T;
FD=1./(1+De/100).^Year; %Factor de descuento
Flujodescontado=Fci.*FD; %Flujo de caja descontado
sumaflujo=sum(Flujodescontado);
VAN=-Ko+sumaflujo;

if VAN>0
    Funcion_objetivo=1/VAN;
else
    Funcion_objetivo=10e20;
end
else
    VT=10e20;
    numero=round(x(1));
    Funcion_objetivo=10e20;
end
else
    VT=10e20;
    numero=round(x(1));
    Funcion_objetivo=10e20;
end
% error=A_Total+1000000*abs(Vcd-VT)*Funcion_objetivo;
error=abs(Vcd-VT)+10000*Funcion_objetivo; %+100000*Vdigestor;
VPN=1/Funcion_objetivo;

```

end

**Anexo C. Datos de molida y porcentaje de cachaza en caña de la zafra 2016.
UEB Central Azucarero Ciudad Caracas.**

Fecha año 2016	Caña molida diaria, t	% Aprovechamiento norma potencial molida	% de cachaza en caña	Cachaza producida, t
08-ene	2837.45	70.5	3	85
09-ene	2834.35	70.4	2.32	65.7
10-ene	2241.75	55.4	3.35	75
11-ene	3102.3	77.08	3.19	118
12-ene	3153.25	78.34	3.38	106.5
13-ene	2819.3	70.04	4.12	116.2
14-ene	2895.95	71.95	3.11	9.2
15-ene	0	0	0	0
16-ene	0	0	0	0
17-ene	3026.65	75.2	3.21	97.1
18-ene	2310.65	57.41	3.62	83.7
19-ene	3176.55	78.92	3.22	102.2
20-ene	3382.4	84.03	4.09	138.44
21-ene	3131.6	77.8	3.05	95.4
22-ene	2484.9	61.74	3.22	79.9
23-ene	1366.7	33.96	3.59	49.1
24-ene	0	0	0	0
25-ene	0	0	0	0
26-ene	3704.05	92.03	2.78	103
27-ene	3339.55	82.97	3.12	104.2
28-ene	2174.5	54.02	3.53	76.8
29-ene	2529.3	62.84	2.58	65.2
30-ene	0	0	0	0
31-ene	3108.55	77.23	3.28	102.1
01-feb	3158.9	78.48	3.63	114.7
02-feb	3634.1	90.29	3.03	110

03-feb	3209.15	79.73	3.32	106.5
04-feb	3266.6	81.16	3.43	112.2
05-feb	3316.9	82.41	3.9	129.4
06-feb	3672.7	91.25	3.09	113.4
07-feb	2974.3	73.9	3.83	113.8
08-feb	2760.3	68.58	4.05	111.9
09-feb	3588.9	89.17	3.2	114.9
10-feb	2317.1	57.57	3.15	72.9
11-feb	3985	99.01	3.24	129.1
12-feb	2254.7	56.02	3.73	84.1
13-feb	2923.55	72.63	2.93	85.6
14-feb	3458.25	85.92	2.89	99.9
15-feb	2658.4	66.05	3.27	86.8
16-feb	3371.4	83.76	2.55	86.1
17-feb	2038.7	50.65	5.04	102.76
18-feb	2223.65	55.25	4.22	93.9
19-feb	3571.1	88.72	2.68	95.8
20-feb	2807.45	69.75	3.36	94.4
21-feb	3733.7	92.76	2.74	102.29
22-feb	3781.7	93.96	3	113.5
23-feb	0	0	0	0
24-feb	3445.7	85.61	3.3	113.6
25-feb	3606.75	89.61	3.32	119.7
26-feb	1585.7	39.4	2.85	45.2
27-feb	2834.5	70.42	3.65	103.47
28-feb	3755.45	93.3	3.42	128.4
29-feb	1693.05	42.06	3.32	56.2
01-mar	2045.8	50.83	4.31	88.2
02-mar	3191.3	79.29	3.81	121.5
03-feb	3878.55	96.26	2.87	111.3
04-mar	3000.45	74.55	3.66	109.9
05-mar	2092.85	52	3.66	76.7
06-mar	1693.3	42.07	3.67	62.1

07-mar	4061.85	100.92	2.58	104.81
08-mar	3560.05	88.45	3.39	120.7
09-mar	3019.46	75.02	2.46	74.19
10-mar	2851.4	70.84	2.99	85.2
11-mar	3102.3	77.08	5.57	172.7
12-mar	2627.5	65.28	3.62	95.1
13-feb	3786.8	98.17	3.31	125.2
14-mar	3248.6	80.71	2.65	86
15-mar	2603.45	64.68	4.53	117.9
16-mar	3000.15	74.54	2.93	87.9
17-mar	936.1	23.26	3.42	32
18-mar	3770.85	93.69	3.21	121
19-mar	2961.6	73.58	4.56	135.01
20-mar	2881.55	71.59	3.51	101.1
21-mar	3742.95	92.99	3.4	127.1
22-mar	3710.95	92.2	2.42	89.89
23-mar	3073.6	76.11	3.28	100.4
24-mar	2728.45	68.28	2.57	70.7
25-mar	3386.85	84.15	2.16	73.1
26-mar	3742.6	92.98	3.36	125.8
27-mar	3313.25	82.32	3.01	99.7
28-mar	3522.65	87.52	3.08	108.6
29-mar	2906.85	72.22	2.92	85
30-mar	2486.65	61.78	3.45	85.9
31-mar	3299.75	81.98	3.42	112.8

Anexo D. Cálculo de los indicadores de sostenibilidad

Energía necesaria para cocción

Se parte de los m^3 de biogás necesarios calculados según ecuaciones (2.1) y (2.2) para 300 comensales en comedor obrero y 100 núcleos con 4 personas por núcleo.

$$V1 = 7.08 + 0.073 \cdot Ct = 7.08 + 0.073 \cdot 300 = 28.98 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$V2 = 0.4 \cdot Nump \cdot Nuc = 0.4 \cdot 4 \cdot 100 = 160 \text{ m}^3/\text{día}$$

Considerando un valor calórico del biogás de 20 MJ/ m^3 y una eficiencia de la cocción con biogás de 57.3%, entonces la energía para cocción será:

$$\text{Comedor obrero: } 28.98 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot \frac{20\text{MJ}}{\text{m}^3} \cdot 0.573 = 332.11 \frac{\text{MJ}}{\text{día}}$$

$$\text{Consumidores residenciales: } 160 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot \frac{20\text{MJ}}{\text{m}^3} \cdot 0.573 = 1833.6 \frac{\text{MJ}}{\text{día}}$$

El consumo de energético total para cocción en el escenario con biogás es:

$$TEDC_{biogas} = 332.11 \frac{\text{MJ}}{\text{día}} + 1833.6 \frac{\text{MJ}}{\text{día}} = 4577.7 \frac{\text{MJ}}{\text{día}}$$

Considerando que para el escenario base se mantiene esta necesidad de energía para cocción, pero que en el caso del comedor obrero se realiza en una cocina de leña y para el sector residencial fundamentalmente con electricidad, ambas tecnologías con eficiencias iguales a 17% y 80% respectivamente (ver tabla 3.4), entonces la energía necesaria para el escenario base para cada uno de estos portadores es:

Para la leña:

$$E_l = \frac{332.11 \frac{\text{MJ}}{\text{día}}}{0.17} = 1953.6 \frac{\text{MJ}}{\text{día}}$$

Para la electricidad:

$$E_e = \frac{1833.6 \frac{\text{MJ}}{\text{día}}}{0.8} = 2292 \frac{\text{MJ}}{\text{día}}$$

El consumo de energético total para cocción en el escenario base es:

$$TEDC_{base} = 1953.6 \frac{\text{MJ}}{\text{día}} + 2292 \frac{\text{MJ}}{\text{día}} = 4245.6 \frac{\text{MJ}}{\text{día}}$$

DIMENSIÓN ECONÓMICA

Costo de la energía para cocción (CEC)

$$CEC = \sum_i \left(LUC_i \cdot \frac{E_i}{TEDC} \right)$$

Precio de la energía eléctrica

$$LUC_e = 0.09 \frac{\$}{kWh} \cdot 0.2778 \frac{kWh}{MJ} = 0.025 \frac{\$}{MJ}$$

Precio del Biogás (considerando un valor calórico del biogás de 20 MJ/m³)

$$LUC_b = 0.5 \frac{\$}{m^3} \cdot \frac{1}{20 \frac{MJ}{m^3}} = 0.025 \frac{\$}{MJ}$$

Precio de la leña (considerando precio de compra según comercializadora AZUMAT igual a 133.2 \$/cuerda, con una densidad de 32lb/ft³ y un valor calórico de 14486 MJ/t)

$$LUC_l = 133.2 \frac{\$}{cuerda} \cdot \frac{1}{128 \frac{ft^3}{cuerda}} \cdot \frac{1}{32 \frac{lb}{ft^3}} \cdot 2200 \frac{lb}{t} \cdot \frac{1}{14486 \frac{MJ}{t}} = 0.005 \frac{\$}{MJ}$$

Escenario Base

$$\begin{aligned} CEC_{base} &= \sum_i \left(LUC_i \cdot \frac{E_i}{TEDC} \right) = LUC_e \cdot \frac{E_e}{TEDC_{base}} + LUC_l \cdot \frac{E_l}{TEDC_{base}} \\ &= 0.025 \cdot \frac{2292}{4245.6} + 0.005 \cdot \frac{1953.6}{4245.6} = 0.016 \$/MJ \end{aligned}$$

Escenario con Biogás

$$CEC_{biogas} = LUC_b \cdot \frac{E_b}{TEDC_{biogas}} = 0.025 \cdot \frac{4577.7}{4577.7} = 0.025 \$/MJ$$

Asumiendo como valor cero y uno para normalizar este indicador un 30% por encima del mayor costo unitario y un 30% por debajo del menor costo unitario del escenario base respectivamente se tiene:

$$Valor\ 1 = 0.7 \cdot 0.005 = 0.0035 \$/MJ$$

$$Valor\ 0 = 1.3 \cdot 0.025 = 0.0325 \$/MJ$$

Certidumbre sobre la disponibilidad de energía para cocción (CCEA)

$$CCEA = \sum_i \left(C_i \cdot \frac{E_i}{TEDC} \right)$$

Escenario Base

$$CCEA_{base} = \sum_i \left(C_i \cdot \frac{E_i}{TEDC} \right) = C_e \cdot \frac{E_e}{TEDC_{base}} + C_l \cdot \frac{E_l}{TEDC_{base}} = 1 \cdot \frac{2292}{4245.6} + 1 \cdot \frac{1953.6}{4245.6} = 1$$

Escenario con Biogás

$$CCEA_{biogas} = \sum_i \left(C_i \cdot \frac{E_i}{TEDC} \right) = C_b \cdot \frac{E_b}{TEDC_{biogas}} = 0.79 \cdot \frac{4577.7}{4577.7} = 0.79$$

DIMENSIÓN SOCIAL

Calidad del aire urbano (UAQ)

$$AP_j = \sum_j (EF_{ij} \cdot E_i)$$

Factores de emisión por tipo de combustibles

	Fuel, t /MJ	Leña, t /MJ	Biogás, t /MJ
CO	$0.015 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$0.1101 \cdot 10^{-6}$
TSP	-	$0.8 \cdot 10^{-6}$	$0.0296 \cdot 10^{-6}$
TNMO	$0.005 \cdot 10^{-6}$	$0.050 \cdot 10^{-6}$	$0.0320 \cdot 10^{-6}$

Para el escenario base:

$$AP_{CO} = 0.015 \cdot 10^{-6} \cdot 2292 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot 1953.6 = 1.99 \cdot 10^{-3} \text{ t CO}$$

$$AP_{TSP} = 0.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1953.6 = 1.56 \cdot 10^{-3} \text{ t TSP}$$

$$AP_{TNMOC} = 0.005 \cdot 10^{-6} \cdot 2292 + 0.050 \cdot 10^{-6} \cdot 1953.6 = 0.109 \cdot 10^{-3} \text{ t TNMO}$$

Para el escenario con biogás:

$$AP_{CO} = 0.1101 \cdot 10^{-6} \cdot 4577.7 = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ t CO}$$

$$AP_{TSP} = 0.0296 \cdot 10^{-6} \cdot 4577.7 = 0.135 \cdot 10^{-3} \text{ t TSP}$$

$$AP_{TNMOC} = 0.0320 \cdot 10^{-6} \cdot 4577.7 = 0.147 \cdot 10^{-3} \text{ t TNMO}$$

Para normalizar:

Valor 1 = 0 t para todos los contaminantes.

Para el escenario base:

$$\text{Valor } 0_{CO} = 10.7 \cdot 10^{-6} \cdot 4245.6 = 45.43 \cdot 10^{-3} \text{ t}$$

$$\text{Valor } 0_{TSP} = 1.187 \cdot 10^{-6} \cdot 4245.6 = 5.04 \cdot 10^{-3} \text{ t}$$

$$\text{Valor } 0_{TNMOC} = 2.694 \cdot 10^{-6} \cdot 4245.6 = 11.44 \cdot 10^{-3} \text{ t}$$

Para el escenario biogás:

$$\text{Valor } 0_{CO} = 10.7 \cdot 10^{-6} \cdot 4577.7 = 48.98 \cdot 10^{-3} \text{ t}$$

$$\text{Valor } 0_{TSP} = 1.187 \cdot 10^{-6} \cdot 4577.7 = 5.43 \cdot 10^{-3} \text{ t}$$

$$\text{Valor } 0_{TNMOC} = 2.694 \cdot 10^{-6} \cdot 4577.7 = 12.3 \cdot 10^{-3} \text{ t}$$

Independencia energética (EI)

$$EI = \frac{E_i}{TEDC} \cdot 100$$

Para el escenario base EI=0.0%

Para el escenario con biogás EI=100%

Energía útil para cocción (UEC)

$$UEC = \frac{\sum_i (\eta_i \cdot E_i)}{\text{personas}}$$

Para el escenario base:

$$UEC_{base} = \frac{0.8 \cdot 2292 + 0.17 \cdot 1953.6}{700} = 3.09 \frac{MJ}{persona}$$

Para el escenario con biogás

$$UEC_{biogas} = \frac{0.573 \cdot 4577.7}{700} = 3.74 \frac{MJ}{persona}$$

Valores para normalizar:

Para el escenario base:

$$Valor\ 0 = \frac{0.082 \cdot 4245.6}{700} = 0.497 \frac{MJ}{persona}$$

$$Valor\ 1 = \frac{0.8 \cdot 4245.6}{700} = 4.85 \frac{MJ}{persona}$$

Para el escenario biogás:

$$Valor\ 0 = \frac{0.082 \cdot 4577.7}{700} = 0.536 \frac{MJ}{persona}$$

$$Valor\ 1 = \frac{0.8 \cdot 4577.7}{700} = 5.23 \frac{MJ}{persona}$$

DIMENSIÓN MEDIOAMBIENTAL

Intensidad de carbono (CI)

$$CI = \frac{\sum_i CO_2 EF_i \cdot E_i}{personas}$$

Para el escenario base:

Para el sector residencial en el escenario base la energía utilizada es electricidad, por lo tanto, el consumo de electricidad se estima como:

$$kWh = E_e \cdot 0.2778 \frac{kWh}{MJ} = 2292\ MJ \cdot 0.2778 \frac{kWh}{MJ} = 636.7\ kWh$$

Para Cuba el índice de emisiones de CO₂ según (Salazar, Mockey, & Canal, 2010) es 0,795 t CO₂/MWh o sea, las emisiones por cocción con electricidad del escenario base son:

$$CO_{2\text{electricidad}} = 0.795 \frac{t\ CO_2}{MWh} \cdot 0.6367\ MWh = 0.5\ t\ CO_2/día$$

Para el comedor obrero, que se cocina con leña y considerando que la leña contiene un 50% de carbono, las emisiones de CO₂ se calculan como:

$$CO_{2\text{leña}} = \frac{1953.6\ MJ}{14486\ MJ/t} \cdot 0.50 \cdot 0.99 \cdot \frac{44}{12} = 0.24\ t\ CO_2/día$$

El índice de carbono será:

$$CI = \frac{\sum_i CO_2 EF_i \cdot E_i}{personas} = \frac{0.5 + 0.24}{700} = 0.00105 \frac{t\ CO_2}{persona}$$

La normalización fue llevada a cabo igualando uno a $CI = 0 \text{ t CO}_2/\text{persona}$ y cero a un CI calculado considerando las emisiones con electricidad que son las mayores emisiones, o sea:

$$\text{Valor 1} = 0 \text{ t CO}_2/\text{persona}$$

$$\text{Valor 0} = \frac{0.5}{400} = 0.00125 \text{ t CO}_2/\text{persona}$$

Mitigación del calentamiento global (GWM)

Gases de efecto invernadero

$$GHG_E = \sum_i \left(\sum_j EF_{ij} \cdot E_i \cdot GWP_j \right)$$

Para el escenario base:

Factores de emisiones:

	Fuel, t /MJ	Leña, t /MJ	Biogás, t /MJ
CO ₂			$81.5 \cdot 10^{-6}$
N ₂ O	$0.6 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$56.7 \cdot 10^{-9}$
CH ₄	$3 \cdot 10^{-9}$	$30 \cdot 10^{-9}$	$5.36 \cdot 10^{-9}$

Emisiones diarias de CO₂ = 0.74 t CO₂

Emisiones diarias de N₂O = $0.6 \cdot 10^{-9} \frac{t}{MJ} \cdot 2292 \text{ MJ} + 4 \cdot 10^{-9} \frac{t}{MJ} \cdot 1953.6 \text{ MJ} = 9.19 \cdot 10^{-9} \text{ t N}_2\text{O}$

Emisiones diarias de CH₄ = $3 \cdot 10^{-9} \frac{t}{MJ} \cdot 2292 \text{ MJ} + 30 \cdot 10^{-9} \frac{t}{MJ} \cdot 1953.6 \text{ MJ} = 65.48 \cdot 10^{-9} \text{ t CH}_4$

Con el potencial de calentamiento global GWP_j del GHG j (CO₂=1, CH₄=25, N₂O=298) se tiene:

$$GHG_{base} = 0.74 + 9.19 \cdot 10^{-9} \cdot 298 + 65.48 \cdot 10^{-9} \cdot 25 = 0.74 \text{ t CO}_2e$$

Para el escenario con biogás:

$$GHG_{biogas} = 81.5 \cdot 10^{-6} \cdot 4577.7 + 56.7 \cdot 10^{-9} \cdot 4577.7 \cdot 298 + 5.36 \cdot 10^{-9} \cdot 4577.7 \cdot 25$$

$$= 0.451 \text{ t } CO_2e$$

La mitigación del calentamiento global será:

$$GWM = \frac{GHG_{biogas} - GHG_{base}}{GHG_{base}} \cdot 100 = \frac{0.451 - 0.74}{0.74} \cdot 100 = -39.05\%$$

Gestión de residuos sólidos (SWM)

$$SWM = \frac{SW_{tratados}}{SW_{total}} \cdot 100$$

La cantidad de cachaza total que produce el central diariamente y que es depositada al medio ambiente directamente sin tratamiento previo es de 99.72 t. La cantidad de cachaza a utilizar en la planta de biogás es igual a:

$$Cachaza = SW_{tratados} = \frac{\text{Volumen de cocción}}{120 \frac{m^3}{t \text{ de cachaza}}} = \frac{188.98}{120} = 1.57 \text{ t}$$

$$SWM = \frac{1.57}{99.72} \cdot 100 = 1.574\%$$