



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA).

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Estudio preliminar del aprovechamiento del potencial de biogás de Placetas para el transporte urbano.

Autor: Adrián Marcos Armas Paín

Tutor: Dr.C. Iosvani López Díaz

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830
Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Pensamiento

“Cuba prioriza hoy el desarrollo de las fuentes renovables de energía, su uso eficiente y el ahorro como centro de su política nacional frente a la crisis energética que vive el mundo”

Fidel Castro Ruz.

A mi Mamá y mi Papá, por traerme a la vida y convertirme en el hombre que hoy soy.

A mi Mamá, por su insuperable sacrificio para poder convertirme en profesional.

A mi Papá, por ser mi guía y ejemplo en todos los aspectos de la vida. A ellos especialmente está dedicado este trabajo.

A mi hermana y mejor amiga, por sus sabios consejos en momentos difíciles.

A mi familia, por su constante apoyo y preocupación.

A mi novia, por saber impulsarme en los momentos que pensaba que no podía seguir.

Este trabajo es el resultado del esfuerzo de muchas personas que de forma directa o indirecta han ayudado a su terminación. Es imposible mencionarlos a todos, sin embargo debo referirme a algunos por sus decisivos aportes. A todos muchas gracias.

A mi tutor Dr.C. losvani López Díaz, por sus sabios consejos y la invaluable ayuda prestada.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería Mecánica por el conocimiento que me brindaron durante estos años, especialmente los del CEETA.

A mis compañeros de año, por los momentos buenos y malos compartidos para lograr este sueño.

A todos los mencionados y a los que no se mencionan,

MUCHAS GRACIAS.

La creciente demanda de energía a nivel mundial ha tenido como efecto una mayor demanda de combustibles fósiles lo cual ha conllevado a una búsqueda de combustibles alternativos como por ejemplo el biogás. El presente trabajo está orientado a la evaluación de la posibilidad de utilización del biogás procedente de la explotación porcina en el municipio de Placetas para el servicio de transporte urbano de los municipios Santa Clara y Placetas. En el mismo se estudian las generalidades sobre el biogás y los procesos de limpieza del mismo para su posterior utilización en el motor, se calcula el potencial de biogás para tres escenarios correspondientes a 25 000, 30 000 y 35 000 cerdos y se caracteriza el servicio de transporte de los municipios objeto de estudio, definiendo la demanda de combustible de cada uno de ellos. Estos últimos valores son empleados para un balance energético que permitió definir la cantidad de combustible fósil a sustituir en Santa Clara, luego de haber cubierto con biometano toda la demanda energética del transporte de Placetas. Además se identificó un posible motor a gas para remotorizar el ómnibus Diana con la finalidad de ser empleado en el servicio de transportación alimentado con biometano y se evaluaron los principales parámetros del motor para definir la viabilidad de este cambio de motor.

The growing demand for energy worldwide has had as an effect a greater demand for fossil fuels which has led to a search for alternative fuels such as biogas. The present work is oriented to the evaluation of the possibility of using the biogas from the swine exploitation in the municipality of Placetas for the urban transport service of the Santa Clara and Placetas municipalities. In it, the general aspects of biogas and its cleaning processes are studied for later use in the engine, the biogas potential is calculated for three scenarios corresponding to 25,000, 30,000 and 35,000 pigs and the service is characterized of transport of the municipalities object of study, defining the demand of fuel of each one of them. These last values are used for an energy balance that allowed to define the quantity of fossil fuel to be replaced in Santa Clara, after having covered with biomethane all the energetic demand of the transport of Placetas. In addition, a possible gas engine was identified to remotorize the Diana bus with the purpose of being used in the transportation service powered by biomethane and the main parameters of the engine were evaluated to define the viability of this engine change.

Índice:

Introducción.....	1
Problema de investigación.	3
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos	4
Capítulo I: Biogás. Usos y potencialidades del biogás.....	5
1.1 Generalidades sobre el biogás.	5
1.1.1 Obtención.	5
1.1.2 Propiedades del biogás.	9
1.1.3 Aplicaciones del biogás.	11
1.1.3.1 Producción de calor o vapor.	12
1.1.3.2 Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad.	13
1.1.3.3 Combustible para vehículos.	14
1.1.3.3.1 Elementos generales de los motores que utilizan el biogás como combustible .	14
1.2 Purificación o acondicionamiento del biogás.	20
1.3. Valorización del biogás.....	21
1.3.1. PSA (Pressure Swing Adsorption)	22
1.3.1.1 Descripción del proceso.	22
1.3.1.2 Costos de inversión y consumos.	23
1.3.1.3 Suministradores de sistemas PSA.	24
1.3.2 Absorción con agua.	25
1.3.2.1 Descripción del proceso.	25
1.3.2.2 Costos de inversión y consumos.	26
1.3.3 Absorción con disolventes orgánicos.....	28
1.3.3.1 Descripción del proceso.	28
1.3.3.2 Costos de inversión y consumos.	29
1.3.4 Absorción química.....	31
1.3.4.1 Descripción del proceso.	31
1.3.4.2 Costos de inversión y consumos.	31
1.3.5 Separación con membranas.....	33

1.3.5.1 Descripción del proceso.	33
1.3.5.2 Costos de inversión y consumos.	33
1.5 Utilización del biogás en el transporte.	34
1.6 Aplicaciones potenciales de la utilización del biogás en Cuba.	36
Conclusiones parciales.	38
Capítulo II: Materiales y métodos	39
2.1 Evaluación del potencial de biogás de Placetas.	39
2.1.1 Determinación del potencial del biogás en Placetas.....	41
2.2 Caracterización del sistema de transportación en los municipios de Santa Clara y Placetas. Determinación de la demanda energética.....	42
2.3 Evaluación del aprovechamiento energético del biogás en el transporte urbano en los municipios de santa Clara y Placetas.	48
2.4 Estudio de la posibilidad de sustitución del motor actual (YC4E (4110)-20) del ómnibus Diana por el motor del propio fabricante a gas (YC4G180N-30)	49
2.4.1 Metodología de cálculo de tracción del motor Yuchai YC4E (4110)-20, como elemento motriz del ómnibus Diana.....	51
Conclusiones parciales.	56
Capítulo III. Análisis y discusión de los resultados.	57
3.1 Evaluación del potencial de biogás de Placetas.	57
3.2. Evaluación del aprovechamiento energético del biogás en el transporte urbano en los municipios de santa Clara y Placetas.	59
3.3. Estudio de la posibilidad de sustitución del motor actual YC4E (4110)-20 del ómnibus Diana por el motor del propio fabricante a gas (Yuchai YC4G180N-30).....	61
Conclusiones generales.	63
Recomendaciones:	64
Bibliografía.....	65

Introducción

Introducción

El hombre desde sus inicios ha usado la energía como medio para satisfacer sus más elementales necesidades: alumbrarse, cocinar los alimentos, calentarse en el invierno, etc. A través de los tiempos, su uso se fue volviendo parte indispensable de la permanencia de nuestra especie en el planeta, pero fue a partir de la Primera Revolución Industrial (1750-1840) en que el hombre comenzó a hacer uso creciente y a gran escala de los recursos energéticos que poseía, principalmente los combustibles fósiles. En un intervalo de menos de doscientos setenta años, ha sido tan rápido e indiscriminado el uso de estos combustibles, que se ha alterado el equilibrio ecológico del planeta, situación que hoy amenaza la existencia misma de la especie humana.

Dentro de los graves problemas ambientales a que están expuestos los ecosistemas, (incluyendo al hombre) y que se ha agudizado a partir de la mitad del siglo pasado, está la contaminación atmosférica, principalmente originada por la actividad antropogénica, dado por la quema de combustibles fósiles, el crecimiento y desarrollo industrial y del transporte, induciendo a la disminución de la capacidad asimiladora y regeneradora de la naturaleza. (Martínez, 2004)

Se conocen como combustibles fósiles el carbón, el petróleo y el gas, derivados de la descomposición de materiales orgánicos ocurrida hace millones de años. Debido a que el proceso de formación de estos combustibles demora millones de años se les considera no renovables. La energía contenida en ellos es obtenida en todos los casos mediante un proceso de combustión, en el cual, el combustible rico en carbono reacciona con el oxígeno, desprendiendo su energía en forma de calor y luz. Asimismo, esta reacción exotérmica da como resultado la formación de diferentes gases, que normalmente se acumulan en la atmósfera. (B.P, 2011)

En la actualidad, la humanidad utiliza una política energética establecida en su mayoría sobre la base de los combustibles fósiles para poder obtener los servicios que necesita. Estos son responsables de suplir la mayor parte de la demanda energética mundial. Además de ser utilizados para la producción de electricidad, se utilizan en la mayoría de los procesos térmicos.

Estas elecciones energéticas a escala industrial influyen profundamente sobre el sistema ecológico de nuestro planeta. Los resultados catastróficos pueden ser constatados hoy cuando cada día desaparecen definitivamente más de diez especies de animales y plantas producto de la destrucción de los bosques tropicales como consecuencia de las lluvias ácidas, causantes además del empobrecimiento de los terrenos y la contaminación de millones de lagos. (Turrini, 2006)

Otra de las consecuencias del uso indiscriminado de los combustibles fósiles es la creación del efecto invernadero artificial, con la consecuente elevación de la temperatura media de la superficie terrestre. Su principal fuente es la liberación de dióxido de carbono (CO_2) en los procesos de combustión y la disminución de los bosques, fundamentales por su función de absorción del mismo. También son importantes las emanaciones de metano (CH_4), debido, entre otros factores, a la ganadería intensiva sin el tratamiento adecuado de los residuales; y las emanaciones de óxido de nitrógeno (N_2O), las cuales se deben en buena parte a la fertilización artificial y a la combustión de los fósiles. (Turrini, 2006)

En los últimos años esta situación ha propiciado que las fuentes renovables de energía hayan adquirido una importancia cada vez mayor a nivel global. El déficit de energía que sufre el mundo actual y en particular los países subdesarrollados hacen que sea prioritario el desarrollo de las fuentes renovables de energía.

En esta dirección toma especial interés un biocombustible que está muy relacionado en la actualidad con el medio rural, ya sea en explotaciones agrícolas o especialmente en la ganadería denominado biogás.

Este recurso energético renovable es un gas combustible que se genera por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos en un ambiente anaeróbico (ausencia de oxígeno). La mezcla gaseosa que se obtiene contiene principalmente metano (CH_4) que puede conformar entre (50-70) % de la mezcla, también contiene dióxido de carbono (CO_2) (30-50) %, sulfuro de hidrógeno (H_2S) (1-3) % y otros (0-2) %. (Artigas, 2015)

Cuba promueve el desarrollo de esta tecnología como tratamiento de los residuales derivados de la producción porcina desde instituciones como el MINAG, CITMA, Empresa de Porcino, ANAP, etc. Esta tecnología además de lograr un adecuado manejo de residuales, proporciona un alto beneficio energético con el biogás producido y además genera biofertilizante de alta calidad.

Debido al uso de esta tecnología en el municipio de Placetas, el cual constituye el mayor productor de carne de cerdo a nivel nacional, en la actualidad se genera un potencial de biogás que no está siendo debidamente explotado como recurso energético. Sin embargo, si se consigue con esta tecnología un adecuado manejo de los residuales, lo cual resulta de gran interés ambiental ya que el municipio se encuentra enmarcado sobre la cuenca hidrográfica Zaza.

Actualmente el Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA), de la Universidad Central “Marta Abreu “de las Villas, intenta encontrar una solución tecnológica adecuada que garantice un adecuado aprovechamiento energético de este recurso renovable. Dentro de las alternativas a estudiar se encuentran la generación de electricidad con motores de combustión interna, empleo de la energía térmica del biogás en proceso vinculados a la matanza de cerdos y elaboración de productos derivados, cogeneración, etc. Y en menor medida se ha estudiado la idea de poder emplear este combustible en motores de combustión interna que funcionan a velocidad y carga variable como es el caso del transporte.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado y el interés que ha manifestado el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) sobre la evaluación de alternativas energéticas que puedan sustituir el empleo de combustibles fósiles en diferentes servicios, como es el caso del transporte. La presente investigación se plantea como problema objeto de estudio:

Problema de investigación.

Se necesita definir el potencial de biogás que presenta el municipio de Placetas, derivado de la producción porcina, y evaluar la posibilidad de emplear el mismo en el servicio de transporte urbano en los municipios de Santa Clara y Placetas.

Y para dar solución al mismo se plantean como objetivos a desarrollar los siguientes:

Objetivo General

Evaluar la posibilidad de aprovechamiento energético del biogás producido en Placetas en el transporte urbano para los municipios Santa Clara y Placetas.

Objetivos Específicos

1. Estudiar las generalidades del biogás como combustible y definir el potencial de este biocombustible en el municipio de placetas.
2. Caracterizar el servicio de transporte actual de los municipios de Santa Clara y Placetas y definir la demanda de combustible asociada al servicio de transportación.
3. Evaluar la posibilidad de emplear el biogás derivado de la producción porcina de Placetas en el transporte urbano teniendo en cuenta la disponibilidad de este recurso y la demanda exigida por el servicio de transportación.
4. Estudiar la posibilidad de remotorización del ómnibus Diana con el motor YC4G180N-30 para su conversión a gas con la finalidad de emplear el biometano generado en Placetas para el transporte urbano.

Capítulo I: Biogás. Usos y potencialidades del biogás.

1.1 Generalidades sobre el biogás.

Los biocombustibles son recursos energéticos procesados por el ser humano a partir de materias producidas por seres vivos, a las cuales se les denomina “biomasa”. Pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos, y su finalidad es liberar la energía contenida en sus componentes químicos mediante una reacción de combustión. Los mismos emiten casi la misma cantidad de dióxido de carbono que los combustibles fósiles, pero a diferencia de estos, el mismo es vuelto a fijar por la masa vegetal durante su proceso de crecimiento a través del proceso de fotosíntesis. De esta forma se produce un ciclo que hace que el CO₂ liberado a la atmósfera durante el proceso de combustión vuelva a ser fijado y el ciclo tenga un balance cercano a cero en lo que a emisiones se refiere. (Maciel, 2009)

Dentro de los biocombustibles, el biogás se presenta como una alternativa interesante. Surgido de la fermentación en condiciones anaeróbicas de los desechos orgánicos de cualquier índole, el biogás ofrece una atractiva alternativa a los biocombustibles de primera generación. Ya que es posible obtenerlo a partir de cualquier compuesto orgánico como las excretas de animales o humanos, la cachaza, los desechos de destilerías, los componentes orgánicos de los desechos sólidos municipales, los residuos orgánicos de mataderos, el lodo de las plantas de tratamiento de residuales, los desechos orgánicos de las industrias de producción de alimentos, los residuales agropecuarios, etcétera, su materia prima, lejos de tener algún valor, constituye un grave problema medioambiental. (Cesar A.2012)

1.1.1 Obtención.

El biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de degradación de la materia orgánica (biomasa) mediante la acción de microorganismos y otros factores, en un ambiente anaerobio, es decir, en ausencia de oxígeno. A dicho proceso de degradación se le denomina digestión anaerobia.

Comúnmente se emplean el estiércol y orina de cualquier animal (humanos, aves, ganado vacuno y porcino), residuos de origen vegetal (maleza, rastrojos

de cosecha, pajas), los componentes orgánicos de los desechos sólidos municipales, residuos agroindustriales como salvado de arroz, malezas, residuos de semillas, cachaza, desechos de destilerías, desechos orgánicos de las industrias de producción de alimentos, el lodo de las plantas de tratamiento residuales, entre otros. (Artigas, 2015)

Es una fuente de energía renovable, cuyo fundamento es el gas producto de la descomposición anaeróbica de materia orgánica. El biogás es una mezcla de gases originada por la descomposición microbiana de sustancias orgánicas en ausencia de aire, constituyendo un proceso vital dentro del ciclo de la materia orgánica en la naturaleza. Los microbios que producen el gas metano no soportan ni el oxígeno ni la luz. En resumen, es la descomposición de la materia orgánica reduciéndola fundamentalmente a metano y dióxido de carbono a través de un complejo sistema microbiológico.

En este proceso microbiológico se fermenta la materia orgánica transformándola por la acción bacteriana en biogás (compuesto por CH_4 y CO_2 principalmente) y produciendo un fertilizante rico en nutrientes mineralizados y por tanto en disposición inmediata para las plantas. Los digestores, también conocidos como biodigestores, son reactores cerrados que facilitan la digestión anaerobia proporcionando una atmósfera anaeróbica para los organismos responsables de dicho proceso. (Burgos, 2013)

De forma general la tecnología del biogás debe ser abordada desde el proceso de obtención hasta su uso final, ya que solo empleándola como tratamiento de residuales, se generaría un gas combustible con alto contenido de metano que constituye, sin ser usado con fines energéticos, un gas altamente contribuyente al efecto invernadero. El esquema funcional de esta tecnología se muestra en la figura1.

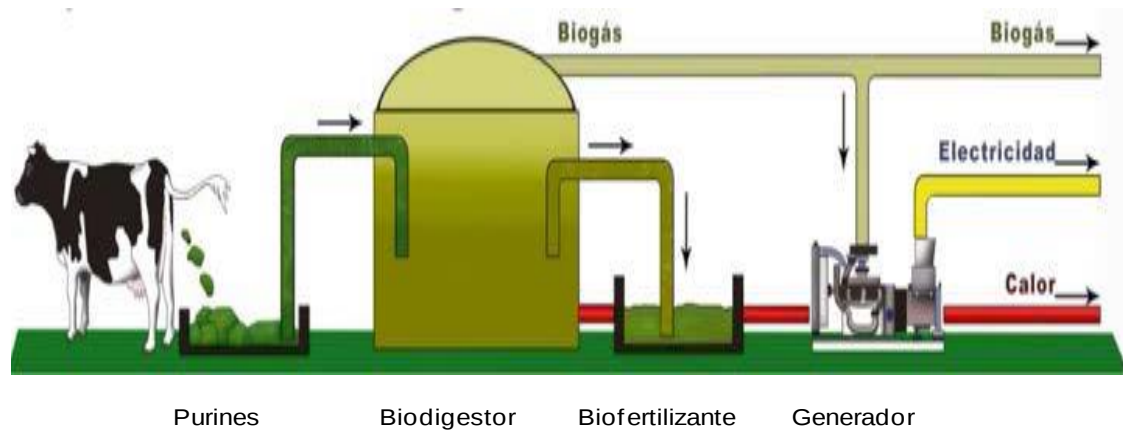


Figura 1: Esquema de un biodigestor. (Ávila, 2018)

Plantas de tambor flotante (Tipo Indú).

Las plantas de tambor flotante consisten en un digestor subterráneo y un recipiente móvil para el gas, según se muestra en la Figura 2. El recipiente para gas flota, ya sea directamente sobre la mezcla de fermentación o en una chaqueta de agua. El gas se recolecta en el tambor de gas, que se levanta o baja, de acuerdo con la cantidad de gas almacenado.

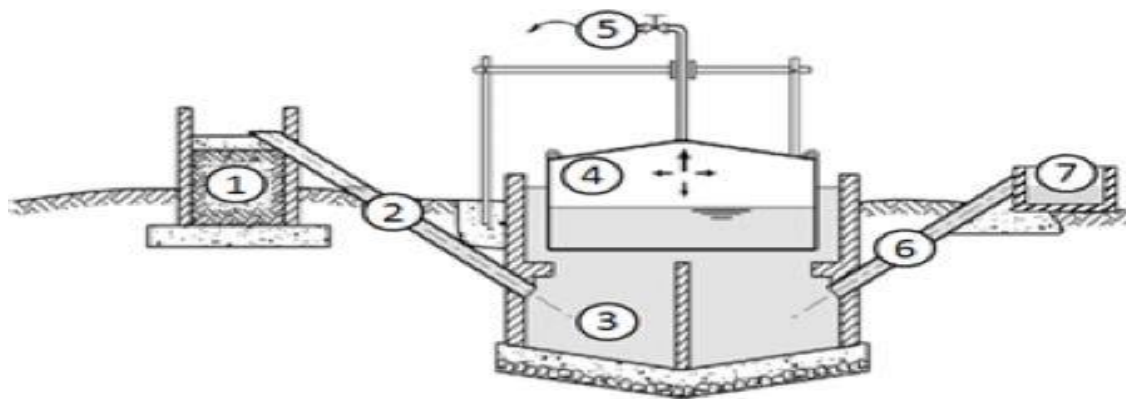


Figura 2: Biodigestor de domo flotante, tipo Hindú. (Ávila, 2018)

1. Cámara de llenado.
2. Tubo de entrada sustrato.
3. Cámara de biodigestión.
4. Domo o cúpula/ gasómetro.
5. Salida de biogás.
6. Tubería de salida digestado.

Plantas de domo fijo.

Estas plantas consisten en un recipiente fijo e inmóvil para gas, que se coloca en la parte superior del digestor (Figura 3). Cuando comienza la producción de gas, la mezcla se desplaza hacia el tanque de compensación. La presión de gas aumenta debido al aumento de volumen del gas almacenado y con la diferencia de altura entre el nivel de la mezcla en el digestor y el nivel de la mezcla en el tanque de compensación.

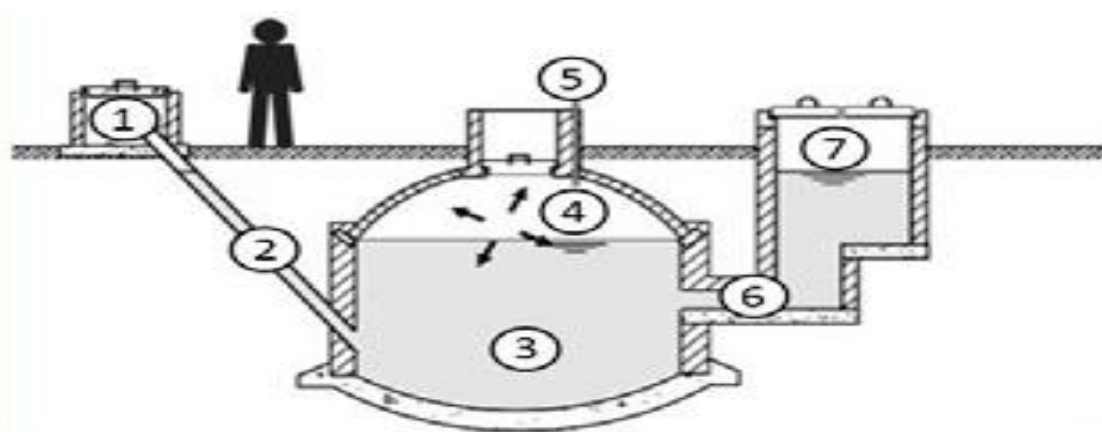


Figura 3: Biodigestor de domo fijo, tipo Chino. (Ávila, 2018)

1. Cámara de llenado.
2. Tubo de entrada sustrato.
3. Cámara de biodigestión.
4. Domo fijo/ gasómetro.
5. Salida de biogás.
6. Tubería de salida digestado.
7. Cámara de acopio digestado.

Biodigestor de Estructura Flexible.

En términos generales, la estructura de la cámara de digestión consiste en un cilindro hecho en alguna membrana impermeable a los gases y líquidos (nylon, caucho, PVC, polietileno) que es depositado en forma horizontal en una fosa excavada en el suelo.

Aunque este modelo trabaja a presiones bastantes bajas, no funciona con residuos orgánicos fibrosos y la duración del cilindro es de unos cinco a diez años (aunque de fácil reemplazo). Es el modelo menos costoso en su

construcción, pues su precio máximo es la décima parte que el modelo menos costoso en otras versiones. (Preston, 2005).

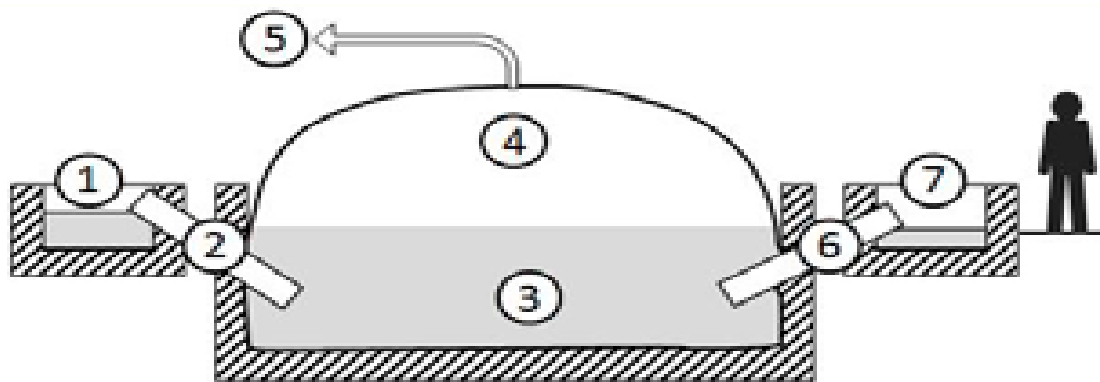


Figura 4: Biodigestor de Estructura Flexible. (Ávila, 2018)

1. Cámara de llenado.
2. Tubo de entrada sustrato.
3. Cámara de biodigestión.
4. Domo o gasómetro flexible.
5. Salida de biogás.
6. Tubería de salida digestado.
7. Cámara de acopio digestado.



Figura 5: Biodigestores de material flexible tipo laguna.

1.1.2 Propiedades del biogás.

El biogás está compuesto aproximadamente por alrededor de 60 % de gas metano (CH_4) y 40 % de dióxido de carbono (CO_2) con mínimas cantidades de otros compuestos. Sus valores límite se indican en la siguiente tabla: El

resultado de la obtención de biogás de manera anaerobia es una mezcla de gases con las composiciones que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Composición del biogás. (Guardado, 2011)

Componentes	Composición (%)
Metano, CH ₄ (g)	50 – 70
Dióxido de carbono, CO ₂ (g)	40 – 60
Sulfuro de hidrógeno, H ₂ S(g)	0 – 3
Dihidrógeno, H ₂ (g)	2– 1

El poder calórico del biogás, con concentraciones entre 50 y 70 % de metano CH₄, es de 4 700 a 6 500 Kcal/m³. (Guardado, 2006)

El biogás posee las siguientes características. (Pérez 2006)

Grado de Inflamación: 6 a 12 % vol. Aire

Temperatura de Inflamación: 600°C

Presión crítica: 82 bar.

Temperatura crítica: -82,5°C.

Peso específico: 1.2 kg/m³.

Debido a las propiedades del biogás se obtienen los siguientes valores comparativos respecto a los combustibles más convencionales. (Pérez 2006)

1m³ de biogás equivale aproximadamente a:

0.61 l. de gasolina.

0.583 l. de keroseno.

0.55 l. de diésel.

1.5 m³ de gas natural.

1.43 KWh de energía eléctrica.

0.5 a 1,5 Kg. de madera.

0.74 Kg. de carbón vegetal.

0.3 m³ de propano.

0.2 m³ de butano.

1.1.3 Aplicaciones del biogás.

Existen diversas opciones para la utilización del biogás. Dentro de éstas destacan la producción de calor o vapor, generación de electricidad y combustible de vehículos.

El biogás es un combustible limpio que proporciona una llama libre de humo y hollín, y por tanto es adecuado para su uso en cocinas de gas, iluminación con lámparas adaptadas o utilización en motores de combustión interna, para equipos como grupos de generación eléctrica, vehículos, incubadoras, refrigeradores, calefacción, etc. También existen equipos de cogeneración de biogás, en los que se genera tanto electricidad como calor buscando la mayor eficiencia posible en el aprovechamiento de la energía contenida en el biogás. Así pues, con el biogás podemos producir energía limpia y renovable, proporcionando independencia energética al consumidor y evitando la utilización de combustibles fósiles y de energía eléctrica proveniente de fuentes no renovables. (Hernández. 2014)

El uso del biogás proporciona al usuario independencia como consumidor energético y de fertilizantes químicos, con una integración total de los recursos aprovechables, dentro del ciclo productivo y social.

En zonas rurales subdesarrolladas principalmente, el uso del biogás mejora significativamente la calidad de vida de las familias. Sirve como combustible sustitutivo a la leña, y utilizándolo en la cocina se eliminan humos y otras sustancias perjudiciales para la salud, ahorra tiempo y facilita las tareas cotidianas contribuyendo a una vida rural más civilizada. Mejora considerablemente las condiciones higiénicas y sanitarias en la vivienda, reduciendo los malos olores provocados por los residuos y evitando la creación de unas condiciones favorables para la proliferación de enfermedades.

Por otro lado, la instalación de biodigestores permite la implementación de sistemas de gestión integral de residuos orgánicos por zonas geográficas, y además crea nuevos puestos de trabajo en las comunidades para realizar labores de producción, mantenimiento, administración y transferencia de la tecnología. (Hernández. 2014)

1.1.3.1 Producción de calor o vapor.

El uso más simple del biogás es para la obtención de energía térmica (calor). En aquellos lugares donde los combustibles son escasos, los sistemas pequeños de biogás pueden proporcionar la energía calórica para actividades básicas como cocinar y calentar agua. Los sistemas de pequeña escala también se pueden utilizar para iluminación. Los quemadores de gas convencionales se pueden adaptar fácilmente para operar con biogás, simplemente cambiando la relación aire-gas. El requerimiento de calidad del biogás para quemadores es bajo. (Varnero, 2011). Sin embargo, en la mayoría de los casos el uso del mismo se limita a quemadores para cocción de alimentos, limitando el consumo de este combustible a pequeña y mediana escala, pero en aplicaciones donde la producción de residuos es alta y existe un elevado potencial de biogás, se convierte en un problema el escaso uso de este combustible, ya que de no emplearse con fines energéticos, termina incorporándose a la atmosfera y contribuyendo al efecto invernadero.

La combustión directa del mismo es empleada por diferentes aplicaciones como es el caso de la compañía Ocean Spray, que diseña e integra sistemas para llevar biogás hasta calderas de última generación con sistemas totalmente automatizados, y controlados a distancia, optimizando el uso del biogás a un menor costo, en la figura 6 se muestra un ejemplo de las instalaciones energéticas desarrolladas por esta compañía (Chad Leatherwood, 2009).



Figura 6. Generadores de vapor con sistema de alimentación automatizado a gas, desarrollado por la compañía Ocean Spray.

Además se destaca en este campo vinculado al empleo del biogás las modificaciones realizadas por General Motors a sus tecnologías de generación de vapor al sustituir combustibles fósiles por biogás (Figura 7)



Figura 7. Modificación técnica realizada a generadores de vapor por General Motors (Chad Leatherwood, 2009).

1.1.3.2 Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad.

Los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible el calor residual que se genera. Algunos sistemas combinados producen principalmente calor y la electricidad es secundaria.

Otros sistemas producen principalmente electricidad y el calor residual se utiliza para calentar el agua del proceso. En ambos casos, se aumenta la eficiencia del proceso en contraste si se utilizara el biogás sólo para producir electricidad o calor. Las turbinas de gas (microturbinas, desde 25 hasta 100 Kw y turbinas grandes, > 100 Kw) se pueden utilizar para la producción de calor y energía, con una eficiencia comparable a los motores de encendido por chispa y con un bajo mantenimiento. Sin embargo, los motores de combustión interna

son los usados más comúnmente en este tipo de aplicaciones. El uso de biogás en estos sistemas requiere la remoción de H_2S (bajo 100 ppm) y vapor de agua.

Las tecnologías para estas aplicaciones son diversas, e incluso se pueden emplear de manera combinada, el aprovechamiento de la energía del combustible en la generación de electricidad con el consiguiente aprovechamiento del calor residual se conoce como cogeneración y es aplicado en diversas instalaciones y sectores productivos.

Las celdas de combustible se consideran las plantas de energía a pequeña escala del futuro para la producción de electricidad y calor con una eficiencia superior al 60 % y bajas emisiones. (Varnero, 2011).

1.1.3.3 Combustible para vehículos.

1.1.3.3.1 Elementos generales de los motores que utilizan el biogás como combustible

El empleo de biogás en motores de combustión interna trae consigo la presencia de gases nocivos dentro de la mezcla gaseosa dentro de la cámara de combustión. Es muy común la presencia de Sulfuro de hidrógeno, el cual es un gas incoloro, de olor desagradable, muy difundido en la naturaleza y en la industria, donde se lo encuentra muchas veces como impureza rechazable. De él se produce abundante cantidad de azufre elemental, ácido sulfúrico y otros productos químicos. Este componente puede superar en ocasiones el 1% en volumen, concentración que se considera elevada y con la cual el biogás se considera corrosivo y ocasiona severos daños al motor. Este efecto corrosivo se acentúa cuando el motor no funciona de forma continua, pues al producirse el enfriamiento del motor se condensa el vapor de agua, el cual forma junto al ácido sulfhídrico, el ácido sulfúrico que es altamente corrosivo. (Cesar A.2012)

El ácido sulfúrico, ataca la superficie de los materiales ferrosos con que se construyen las cámaras de combustión de los motores por lo que se incrementa el desgaste y se pierde la hermeticidad de los cilindros, además también ataca los cojinetes del motor pudiendo destruirlos en poco tiempo. El óxido de azufre (SO_2) que se forma durante la combustión y que está presente en los gases de escape, forma una solución con el vapor de agua que posteriormente emulsiona el aceite, lo que provoca que en poco tiempo el

lubricante pierda, entre otras propiedades, su capacidad de lubricar, tornándose ácido y corrosivo. La presencia de H_2S no solo afecta el motor, sino también al conjunto de accesorios, como válvulas, reguladores de presión, grifos, etc. los cuales se construyen de materiales no ferrosos que se deterioran fácilmente con la formación de los ácidos.

Otro de los problemas presentes en el biogás es el CO_2 . Este gas constituye un lastre dentro de la mezcla, pues ocupa un volumen apreciable y no produce aporte energético durante la combustión; sino que solamente consume parte la energía liberada durante este proceso para incrementar su temperatura. El CO_2 sin embargo se considera por muchos autores como un elemento beneficioso dentro del biogás, pues permite elevar el poder antidetonante de la mezcla, posibilitando utilizar elevadas relaciones de compresión. (Guardado, 2006)

Los motores a gas se pueden clasificar en cuatro grupos: motores a gas de encendido por chispa de baja compresión, motores dual o mixto, motores diesel a gas, motores a gas de encendido por chispa y alta compresión.

Los motores duales y los motores a gas de encendido por chispa funcionan comprimiendo una mezcla de gas combustible y aire, la diferencia entre ambos es que en el primero se provoca el encendido mediante la inyección de un combustible auxiliar y el segundo como su nombre lo indica el encendido es provocado por de la chispa en la bujía. Los Motores diesel a gas funcionan bajo el mismo principio que los motores diesel convencionales, al comprimirse el aire en la cámara de combustión y en las proximidades del PMS es inyectado el combustible gaseoso, ingresando junto con este en el cilindro un combustible auxiliar el cual provoca el encendido. Los motores a gas de encendido por chispa y alta compresión a diferencia de los motores de encendido por chispa y baja compresión utilizan altas relaciones de compresión, buscando una alta presión en el segundo tiempo, lográndose trabajar con una mezcla aire/combustible mayor que el equivalente estequiométrico, disminuyendo la autoinflamación y aumentando el rendimiento del ciclo. (Fonseca, 2003).

Motores a gas de encendido por chispa y baja compresión.

Este tipo de motor trabaja con mezcla estequiométrica o en un valor inferior cercano, característica que provoca el autoencendido o detonación ya que una mezcla enriquecida tiene una mayor cantidad de hidrocarburos, provocando mayores temperaturas en la cámara de combustión, dando paso a la aparición de focos incandescentes en diferentes puntos: en el cilindro, las válvulas y la de la cabeza del pistón, este efecto no tiene tal repercusión en el caso del gas natural compuesto esencialmente por metano, pues su elevada temperatura de autoinflamación (ver tabla 2) no facilita el autoencendido, lográndose utilizar en estos casos relaciones de compresión mayores. Este motor dado a sus altas temperaturas de combustión, presenta valores elevados de emisiones de NOx, por lo que se hace necesario utilizar catalizadores en el escape que reduzcan dichas emisiones. (Fonseca, 2003).

Tabla: 2. Temperatura de autoinflamación de distintos gases.

COMBUSTIBLE	Temperatura de Inflamación	
	En el aire (°C)	En Oxígeno (°C)
Monóxido de Carbono	610	590
Hidrógeno	530	450
Metano	645	645
Propano	510	490
Butano	490	460

El biogás, proveniente del biodigestor (ver figura 8), ingresa al sistema de alimentación del motor por la línea de suministro 12 y luego al regulador de presión 4 donde se dosifica la cantidad de gas que consume el motor en función de la carga. Antes que el gas ingrese al mezclador aire/gas 2, se mide la presión de suministro con el manómetro en “U” 9, y el caudal de gas con el flujómetro 8. El biogás ingresa al motor gracias a la succión que provoca el descenso de los pistones del motor durante la carrera de admisión, vacío que se incrementa cuando el aire, proveniente del filtro 3, pasa por la garganta del mezclador 2. Este vacío sirve también para succionar al diafragma del regulador 14 con lo que se abre el obturador 15. Para regular la cantidad de gas que ingresa al motor en el régimen de potencia máxima se utiliza el tornillo

7. Durante el arranque en frío del motor se abre la electroválvula 5 para derivar directamente el gas a la zona de alto vacío, delante de la válvula de mariposa 13. La velocidad del motor se controla con el regulador centrífugo 10, el cual actúa sobre la válvula de mariposa 13 a través de un sistema de palancas. (Lira Cacho 2011).

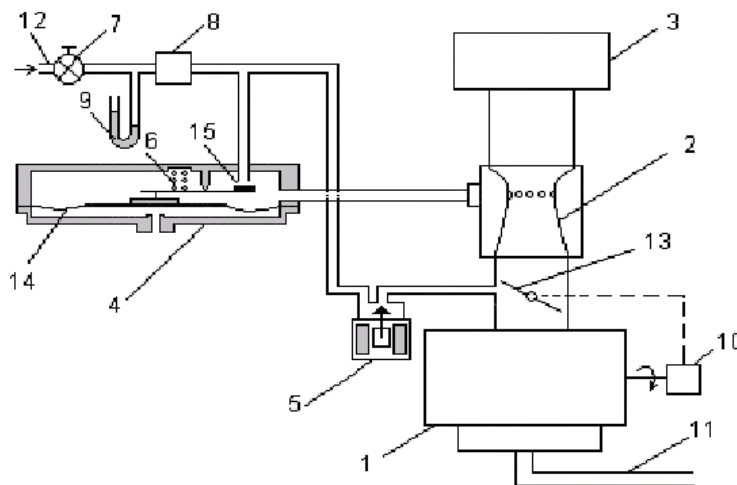


Figura 8. Esquema del sistema de alimentación de biogás: 1-Motor; 2-Mezclador; 3-Filtro de aire; 4-Regulador de presión; 5-Electroválvula; 6-Resorte del regulador; 7-Tornillo regulador de máxima; 8-Flujómetro; 9-Manómetro en U; 10-Regulador de velocidad; 11-Tubo de escape; 12- Línea de suministro de biogás; 13-Válvula de mariposa; 14-Diafragma; 15-Obturador. (Lira Cacho 2011).

Motor diesel a gas

Se denomina así este tipo de motor porque del mismo modo que un motor diesel el aire es comprimido y en un momento cercano al PMS se inyecta el combustible, dado a la baja inflamabilidad del combustible gaseoso en contacto con el aire a alta temperatura y presión, se inyecta junto con el combustible gaseoso uno auxiliar, el cual da paso a la ignición dentro de la cámara de combustión, logrando encender el combustible primario. Se necesita para garantizar la ignición de la mezcla y estabilizar la combustión aproximadamente un 5 % del total del combustible requerido a plena carga.

La mayoría de estos motores han sido reemplazados por motores duales y por motores de gas de encendido por chispa, aunque quedan algunos fabricantes

como Sulzer que fabrican motores de este tipo para potencias entre 15 y 40 MW (Fonseca, 2003). Pues para un mismo rendimiento térmico el costo es mayor; debido a que su construcción compleja, necesitando un compresor de gas, el cual debe entregar el combustible gaseoso entre 80 y 250 bar en la tobera de inyección, válvulas de inyección que admitan gas y líquido al mismo tiempo y un mecanismo hidráulico para controlar la inyección (ver figura: 9).

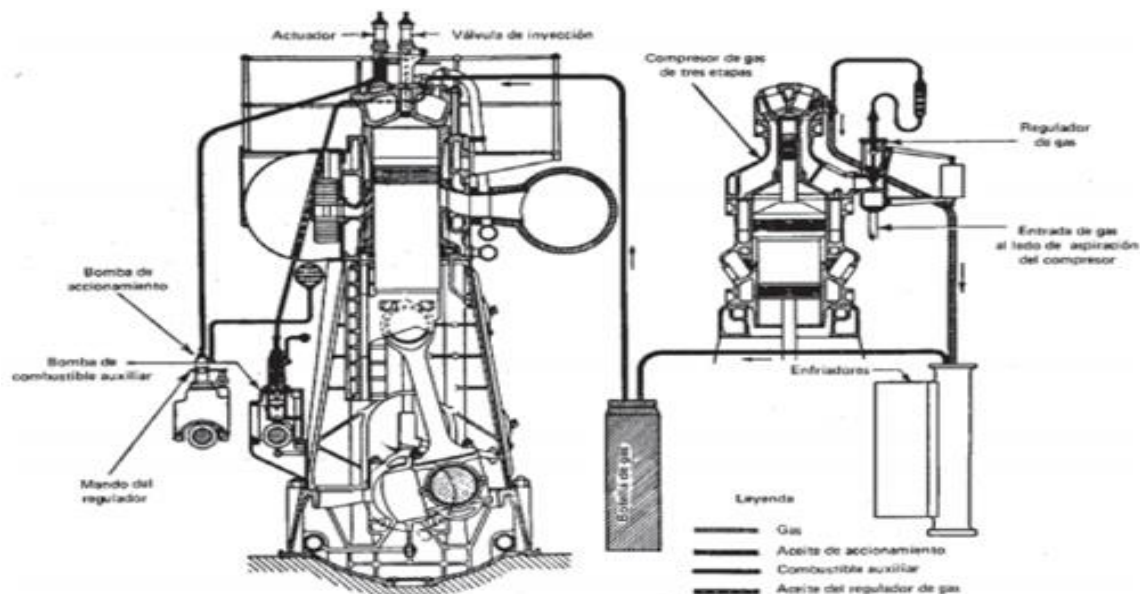


Figura 9. Motor Diesel a gas.

Motores duales.

Estos motores igualmente nombrados motores mixtos, se ha desarrollado al igual que el motor diesel a gas a partir del motor diesel convencional en el transcurso de la segunda guerra mundial en los Estados Unidos por la gran disponibilidad de grandes cantidades de gas natural a muy bajo precio. La presión en estos motores se eleva normalmente como en un motor diesel tradicional, el autoencendido se evita utilizando una relación estequiométrica >1 , en estas circunstancias la composición del combustible que está en contacto con el aire está lejos de los límites de explosión, por lo que la potencia en un motor dual está limitada por la tendencia a la autoinflamación del combustible gaseoso, que en el caso de estos motores es similar o mayor que en los motores diesel convencionales. (Fonseca, 2003).

Para bajos regímenes de carga la mezcla tiende a empobrecerse, situación que afecta la velocidad y propagación del frente de llama, por lo que se debe lograr

previo a la primera etapa de la combustión una niebla en el cilindro que garantice varios puntos incandescentes a la vez, logrando así la propagación del frente de llama a bajas y altas cargas. Para garantizar el funcionamiento de estos motores se ha incorporado un sistema regulador del caudal de aire, adaptado un sistema de inyección de combustible auxiliar.

A un régimen de carga parcial se hace necesario disminuir el caudal de aire que entra el cilindro para mantener la relación aire combustible, pues al mantener el flujo de aire de carga y disminuir la entrada de combustible la combustión se haría lenta de tal manera que el combustible abandonaría la cámara sin ser quemado. Se utiliza un estrangulador del tipo mariposa en el conducto de admisión, en los motores de 4T de aspiración atmosférica, para el caso de los sobrealimentados de desvían los gases de escape antes de entrar a la turbina, lo que da la posibilidad de variar las rpm de la misma y de esta forma regular la presión y el flujo del aire en el compresor. (Fonseca, 2003)

También se ha implementado doble bomba de inyección y en algunos casos doble sistema de inyección, uno para la inyección piloto y el otro para la de operación. Algunos motores con el fin de minimizar el consumo de combustible auxiliar inyectado utilizan bombas de inyección piloto y principal independientes, donde la bomba de combustible auxiliar es controlada por el gobernador del motor de modo que se inyecta más combustible líquido para que la mezcla más pobre se queme completamente y a cargas mayores se inyecta menos combustible piloto pues en estas circunstancias la mezcla es más rica e inflamable.

Motores a gas de encendido por chispa y alta compresión.

A partir del motor dual surge el motor a gas de encendido por chispa, tras la búsqueda de suprimir el combustible auxiliar, a causa de la baja disponibilidad y alto costo del mismo. De esta forma para el encendido de la mezcla pobre, se reemplaza la inyección piloto del combustible auxiliar por una chispa eléctrica.

Las primeras pruebas demostraron que el sistema de encendido de los motores a gas de encendido por chispa de baja compresión no cumplía con los requisitos de resistencia ni de evacuación de calor, pues al necesitar mayor energía para inflamar la mezcla aire-combustible haciéndose necesario un

sistema de alta tensión de 25 000 a 30 000 voltios con bujías blindadas para evitar la combustión de los electrodos y un sistema de refrigeración para las mismas para evitar el preencendido.

La admisión del gas se lleva a cabo de la misma manera que en los motores duales, aunque preferiblemente son sobrealimentados necesitando de esta forma un sistema de regulación automático de caudal de aire para el funcionamiento a cargas reducidas, puesto que de otro modo la mezcla no llegaría a inflamarse. Algunos fabricantes le atribuyen tanta importancia a dicha regulación de aire que implementan una válvula de admisión para cada uno de los cilindros al extremo tal que en algunas ocasiones, se dosifica proporcionalmente el aire a través de todos los regímenes de funcionamiento, manteniendo de esta manera una relación aire / gas casi constante para todas las cargas.

Es algo común la refrigeración de la mezcla en motores sobrealimentados y en algunos casos los atmosféricos, buscando la elevación de la densidad de la mezcla y por consiguiente la potencia del motor, decreciendo la tendencia a la detonación, de esta forma se pueden lograr mayores relaciones de compresión y adelantar el encendido incrementando el rendimiento del motor.

Un fabricante americano nombrado Waukesha, ha desarrollado la serie de motores AT25GL, con un rango de potencia entre 1.4 y 2.7 MW, haciendo uso de esta tecnología de combustión de mezcla pobre aunque usan un sistema de combustión en dos etapas, en la cual una mezcla empobrecida, alrededor del 80 % de exceso de aire, es iniciada por una llama casi estequiométrica originada en una recámara.

1.2 Purificación o acondicionamiento del biogás.

El biogás no es absolutamente puro, puesto que contiene partículas y trazas de otros gases. Todas estas impurezas deben ser removidas dependiendo del tipo de utilización que tendrá el biogás. La purificación del biogás es importante por dos razones principales: (1) para aumentar el poder calorífico del biogás y, (2) cumplir los requerimientos de algunas aplicaciones de gas (motores, calderas, celdas de combustible, vehículos, etc.).

La purificación del biogás es de crucial importancia para garantizar los mejores rendimientos de los procesos de explotación de biogás y para reducir el impacto de las emisiones gaseosas. Naturalmente, los tratamientos de purificación afectan a los costos de producción y consecuentemente al precio final de la energía generada. Los métodos de depuración del biogás pueden clasificarse según diversos criterios: en función de la tecnología utilizada o bien según el contaminante a eliminar.

El H_2S presente en el biogás puede ser eliminado mediante la utilización de diferentes métodos como los biológicos y los basados en técnicas físico – químicas, que incluyen fundamentalmente los mecanismos de adsorción, absorción y el método de separación por membrana. (Rodríguez, 2014)

Las tecnologías de biogás pueden mejorar la rentabilidad y al mismo tiempo mejoran la calidad del aire maximizando los recursos de la población y de esta manera probar que es esencial para un desarrollo competitivo y sustentable en la actual industria del tratamiento de residuos.

El ácido sulfhídrico se forma durante la reducción microbiológica de compuestos que contienen azufre, como los sulfatos, los aminoácidos y los péptidos. El H_2S debe separarse porque es el origen de la corrosión de los equipos empleados en la planta. Adicionalmente, interfiere en la posterior eliminación del dióxido de carbono y puede provocar problemas de olores, además del hecho de que forma dióxido de azufre cuando se quema. Existen diferentes formas de eliminar el H_2S del biogás: mediante adsorción con carbón activo, por precipitación, por medio de absorción química y empleando la biofiltración (Petersson & Wellinger, 2009).

1.3. Valorización del biogás.

En el proceso de valorización del biogás para obtener el biometano se parte del biogás procedente del proceso de limpieza, al cual se le realiza una separación de las impurezas que se encuentran en una menor cantidad y que no se han retirado en la etapa de limpieza, pero el objetivo principal de esta etapa es eliminar el CO_2 que transporta el biogás.

En la práctica, existen distintos métodos empleados industrialmente para la separación del CO_2 , los cuales se basan en las operaciones unitarias de la

ingeniería química: absorción física y química, adsorción, permeación de gases, y otros métodos como los criogénicos. Las técnicas más extendidas en Europa son la absorción física, la adsorción mediante sistemas PSA (Pressure Swing Adsorption), la absorción química y la separación con membranas.

1.3.1. PSA (Pressure Swing Adsorption)

1.3.1.1 Descripción del proceso.

Con los sistemas PSA, el CO_2 , el O_2 y el N_2 se separan por adsorción en zeolitas o carbón activado, a diferentes niveles de presión. El material de adsorción también adsorbe el H_2S , pero a diferencia de la adsorción de CO_2 , esta es irreversible. Por ello esta técnica hace que el biogás valorizado obtenido esté libre de H_2S . Para no destruir el material de adsorción, el H_2S se elimina en una etapa independiente previa. El agua también se separa para evitar que se dañe el proceso de adsorción (Petersson & Wellinger, 2009).

Una planta PSA para la eliminación de CO_2 puede estar construida como se describe a continuación. El biogás procedente de la etapa de limpieza entra en un condensador donde se retira el agua. Después el gas pasa por un filtro de partículas antes de comprimirlo a unos 5 bar. El H_2S se elimina de la corriente de biogás en una columna con carbón activado. Tras quitar el H_2S el gas se enfría en un refrigerador en el que el vapor de agua condensa y es retirado. Entonces el gas puede entrar en los lechos de adsorción de los sistemas PSA para incrementar la concentración de CH_4 (Persson M., 2003).

En la Figura 10 se presenta un esquema del sistema de adsorción mediante un sistema PSA. La adsorción mediante sistemas PSA consiste en 4 lechos de adsorción. Estos lechos están conectados para disminuir la demanda de energía para comprimir el gas. Cada lecho de adsorción trabaja en 4 fases diferentes: adsorción, despresurización, regeneración y presurización. En la fase de adsorción el biogás comprimido atraviesa el lecho. A medida que va pasando por el lecho, el CO_2 , el O_2 y el N_2 se adsorben en la superficie del material adsorbente. El gas que deja el lecho por la parte superior se encuentra enriquecido en CH_4 , conteniendo aproximadamente un 97% de CH_4 . Antes de que el material adsorbente se sature por completo, el biogás se lleva a otro lecho presurizado y ese lecho comienza a regenerarse. Se baja la presión del lecho en varias etapas, hasta casi el vacío. Este lecho de despresuriza por

equilibrio con otro lecho que ya esté regenerado. Entonces se disminuye la presión hasta la presión atmosférica.

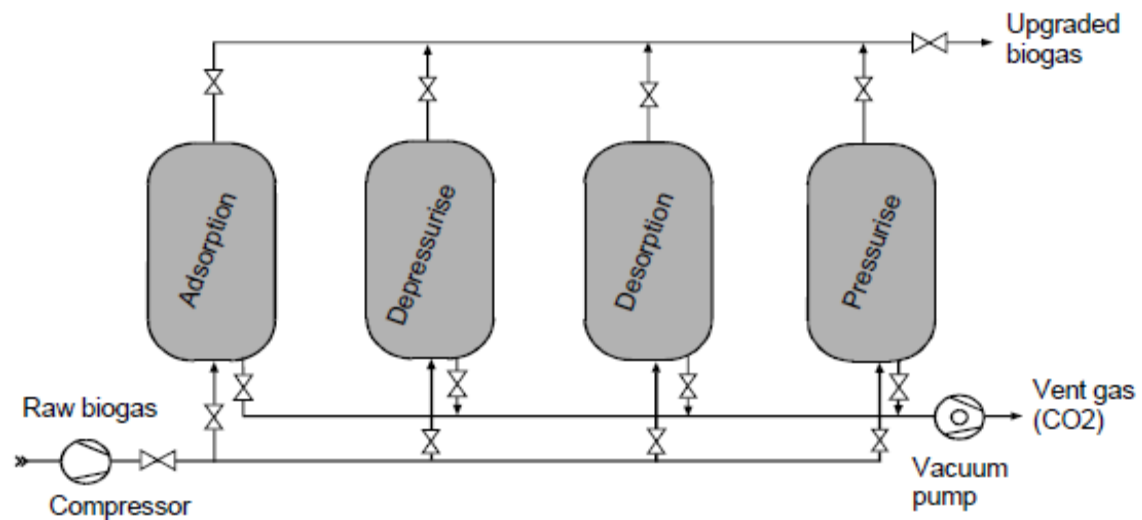


Figura 10. Sistema de adsorción PSA.

Mediante la PSA se obtiene un gas valorizado más limpio que si este mismo gas se tratara por medio de otras técnicas tales como la absorción física con agua. Sin embargo, es requerido un proceso más sofisticado y un mayor control del mismo, incluyendo la recirculación de una parte del gas para evitar unas excesivas pérdidas de metano. Otro inconveniente es la mayor probabilidad de ensuciamiento por la existencia de contaminantes en el biogás.

1.3.1.2 Costos de inversión y consumos.

En cuanto a los costos de inversión, la información existente es poco accesible, pero los datos que se han podido consultar indican que el costo de la inversión para un sistema de adsorción PSA con una capacidad de 500 Nm³/h se sitúa en torno a 1,1-1,44 millones de euros. El costo de inversión específico decrece con el incremento de la capacidad de producción si bien, este costo está enormemente influenciado por varios factores de diseño, como son la composición del biogás que se trate, las especificaciones del biometano que se precisa obtener y la calidad de los materiales de la unidad de adsorción. En la Figura 11 puede verse una gráfica que indica la relación entre el costo de inversión específico frente a la capacidad del sistema de adsorción PSA (García, 2016).

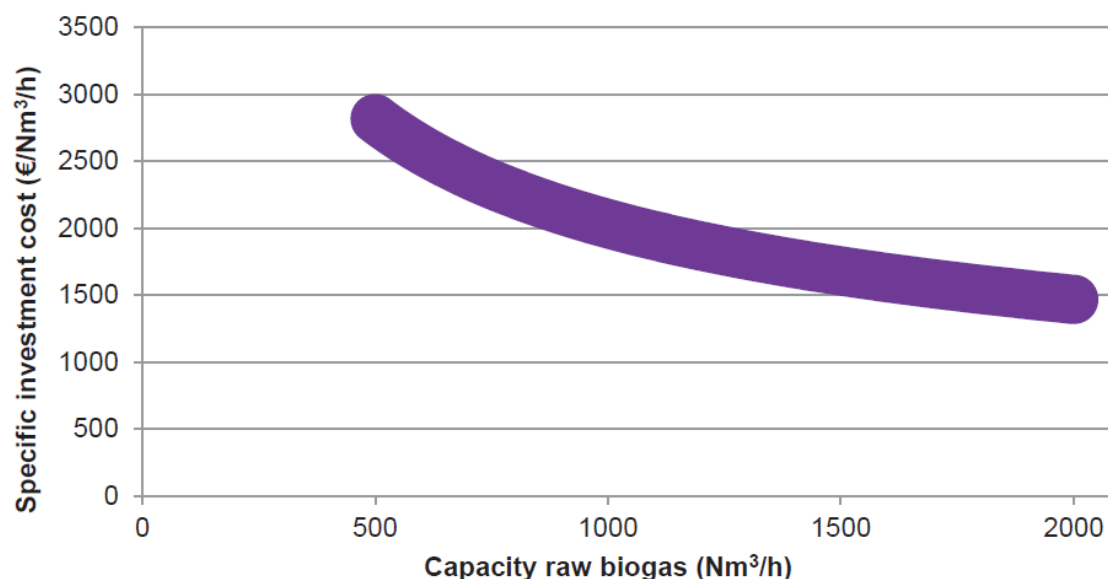


Figura 11. Costo de inversión específico frente a la capacidad del sistema PSA.

La demanda eléctrica del proceso es importante debido a que el sistema requiere la compresión del biogás. Además, puede ser necesario un condensador para eliminar la humedad del gas y para enfriar el gas tras la compresión en el caso de que no se pueda enfriar mediante agua.

Según indican los productores de sistemas PSA, el consumo de electricidad de una unidad de PSA dedicada a la valorización del biogás es de 0,15-0,3 kWh/Nm³ de biogás tratado. En otros datos de bibliografía se exponen consumos eléctricos similares, divididos en 0,2 kWh/Nm³ de biogás más un 0,17 kWh/Nm³ para el secado y la compresión final del gas.

1.3.1.3 Suministradores de sistemas PSA.

En cuanto a los tecnólogos, una de las empresas de mayor prestigio en Europa es Carbotech, una de los principales suministradores de sistemas de inyección de gas a la red. Esta compañía lleva más de 30 años involucrada en la industria del biogás. Sus plantas de valorización de biogás se encuentran repartidas por toda Europa, con una alta eficiencia y con bajos costos de operación en los procesos de transformación de biogás en biometano, así como en la inyección del gas a la red. Su sistema de adsorción mediante PSA patentado es simple y conocido por su bajo consumo de energía. Esto hace que sea la empresa más extendida en Alemania.

El sistema PSA de Carbotech contiene tamices moleculares y está diseñado específicamente y solo para la adsorción de CO_2 , H_2O , H_2S , NH_3 y olores del biogás. Además, el O_2 y el N_2 son eliminados parcialmente, con lo cual se obtiene un biogás enriquecido en metano que recibe el nombre de biometano. (García, 2016)

1.3.2 Absorción con agua.

1.3.2.1 Descripción del proceso.

La purificación de biogás por absorción consiste en el lavado del biogás con un líquido, que mediante algún principio físico o químico capta el CO_2 . Posteriormente, este líquido que porta el CO_2 es sometido al proceso inverso de regeneración de forma que libera el dióxido de carbono y queda fresco para volver al proceso de absorción. La absorción con agua es la técnica de valorización más usada en la actualidad y las plantas que emplean esta tecnología están comercialmente disponibles en un amplio rango de capacidades. Mediante esta técnica, además del CO_2 , también se puede retirar el H_2S y el amoníaco del biogás (Petersson & Wellinger, 2009).

En la Figura 12 se presenta un esquema del sistema de absorción con agua con regeneración. En primer lugar, el agua que condensa se retira del biogás. Posteriormente el biogás se comprime y se alimenta al fondo del lecho de absorción, en donde el gas se encuentra en contracorriente al flujo de agua que desciende desde la parte superior del lecho. El lecho de absorción contiene rellenos desordenados para aumentar la superficie de contacto entre la fase líquida y la fase gas y así conseguir la máxima transferencia de masa posible. En el lecho el CO_2 se absorbe en el agua, mientras que el biogás se enriquece en metano.

Como ya se ha mencionado, el H_2S también se absorbe en el agua y se desorbe parcialmente en la columna de desorción, quedando una parte en el agua. El H_2S puede oxidarse con el aire y producir azufre elemental en la columna de desorción. Este azufre puede causar problemas de taponamiento y ensuciamiento después de algún tiempo de operación de la columna. Por tanto, esta regeneración con aire no se recomienda cuando el biogás contiene altos niveles de H_2S .

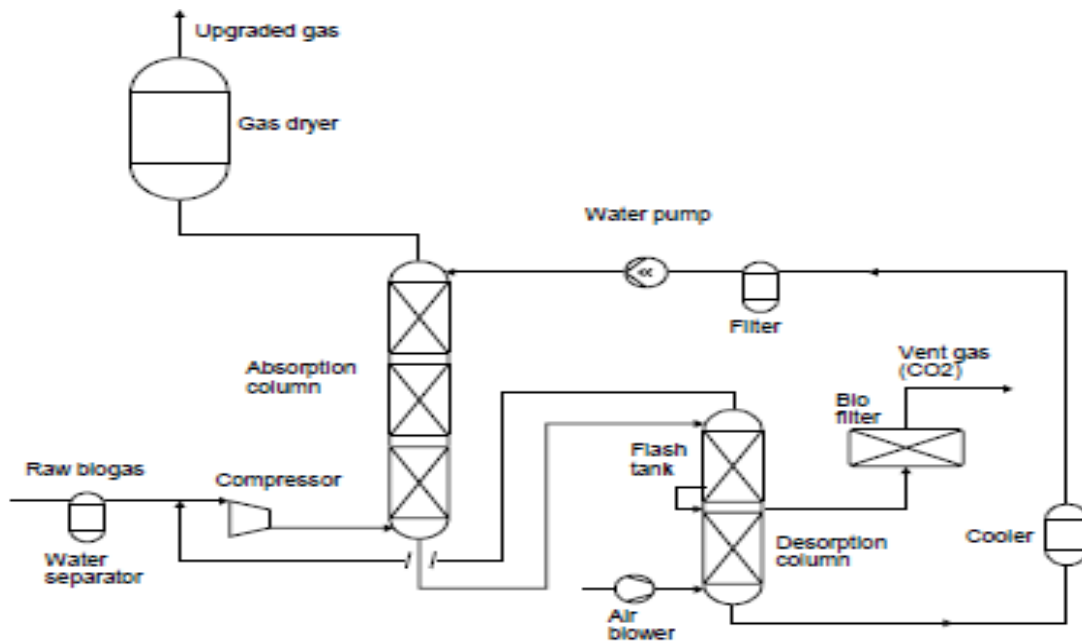


Figura 12. Esquema de la absorción física con agua con regeneración.

Mediante esta técnica puede obtenerse un biometano con una pureza de un 95% de CH_4 con una mínima supervisión de la operación y un solo paso por la columna. Si existe recirculación se consiguen purezas mayores. (García, 2016)

1.3.2.2 Costos de inversión y consumos.

La tecnología de absorción con agua es una tecnología bastante madura, por lo que sus costos de inversión puede suponerse bastante estables, ya que está consolidada en la industria. En la Figura 13 se aprecia la variación de los costos de inversión para los sistemas de absorción con agua en función de la capacidad de la planta. Estos valores están referidos a plantas diseñadas para una capacidad específica, sin posibilidad de futuras expansiones. Los sistemas de limpieza de gases, el sistema de recuperación de calor y el tratamiento posterior del biometano no están incluidos en los costos indicados (García, 2016).

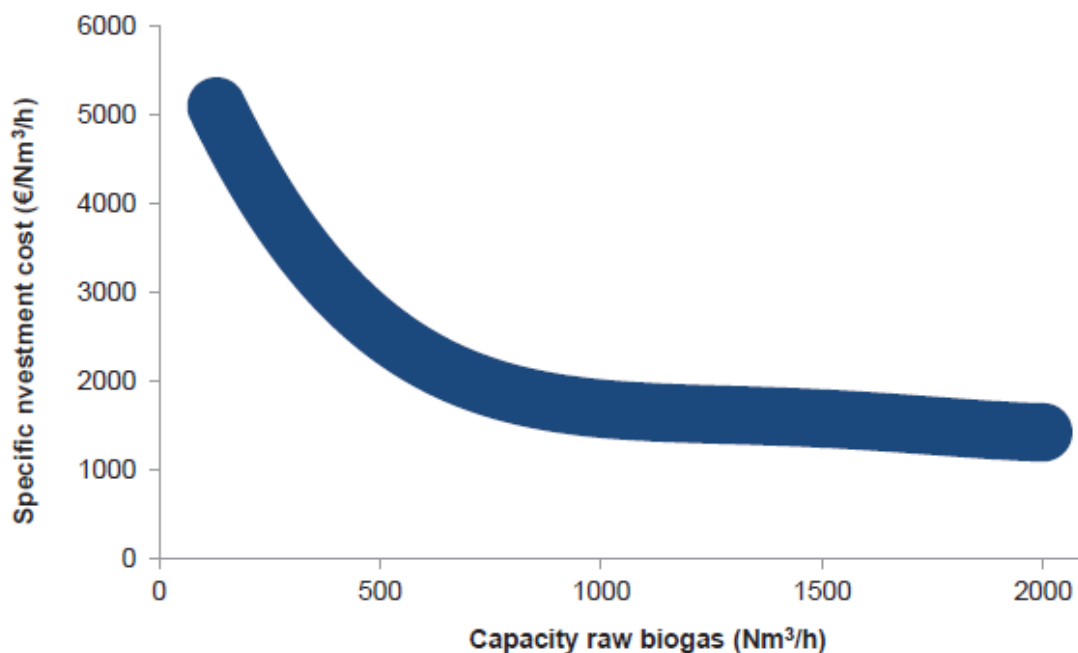


Figura 13. Variación de los costes de inversión específicos en relación a la capacidad de los sistemas de absorción con agua.

Los costos de mantenimiento anuales del sistema de absorción con agua rondan el 2-3 % del costo de inversión. El consumo de energía de este sistema de valorización de un biogás tiene tres fuentes principales: el compresor, la bomba para impulsar el agua y la máquina de enfriamiento. La cantidad de energía que consumen estos equipos depende de las propiedades del biogás que se pretende valorizar, del diseño del sistema de absorción y de las condiciones ambientales.

La energía necesaria para la compresión se sitúa en torno a 0,1-0,15 kWh/Nm³ para conseguir presiones de 6-8 bar. La energía necesaria para el bombeo depende del volumen de agua, la presión que se quiere dar al agua y la eficiencia de la bomba. Por término medio, la energía necesaria para que la bomba impulse el agua es de unos 0,05-0,1 kWh/Nm³ en las condiciones de diseño. La energía necesaria para enfriar el agua del proceso y el gas comprimido depende de varios factores tales como el clima de la zona y del diseño del sistema de absorción. La energía consumida por la máquina de enfriamiento es alrededor de 0,01-0,05 kWh/Nm³ de biogás. (García, 2016)

Greenlane Biogás se dedica al suministro de equipos de absorción con agua para la valorización de biogás. Tiene un amplio número de unidades en función del tamaño de la instalación, desde 50 hasta 2 500 Nm³/h (García, 2016).

1.3.3 Absorción con disolventes orgánicos.

1.3.3.1 Descripción del proceso.

La absorción con solventes orgánicos es bastante similar al lavado con agua, con la diferencia de que el CO₂ se absorbe en un absorbente orgánico, como, por ejemplo, el polietilenglicol. El CO₂ es mucho más soluble en polietilenglicol que en agua, por lo que para el mismo caudal de gas que se trate, el caudal de líquido que se necesite será menor y, por ende, se requerirán unos equipos de menor tamaño, lo que repercute positivamente en los costes de inversión. La solución de polietilenglicol se regenera por medio de un calentamiento o una despresurización. Además, el H₂S, el agua y el O₂ también pueden ser eliminados junto con el CO₂, si bien estos compuestos ya han sido eliminados previamente en el proceso de limpieza del biogás. Ejemplos comerciales de solventes orgánicos son el Selexol y el Genosorb (Petersson & Wellinger, 2009).

En la Figura 14 se presenta un esquema de un sistema de absorción con Selexol empleado en una planta de Suecia (Persson M. 2003). En primer lugar, el H₂S se elimina del biogás. Después el gas se enfría y se retira el agua condensada. Entonces el biogás se comprime y se enfría de nuevo antes de introducirlo por el fondo del lecho de absorción. El Selexol se alimenta desde la parte superior de la columna para mantener un contacto en contracorriente entre el gas y el líquido. Al igual que ocurría en la absorción con agua, la columna está equipada con rellenos desordenados para conseguir una mayor superficie de contacto y lograr una mayor transferencia de masa en la fase líquido-gas. Una vez que el gas sale de la columna por la parte superior, éste se encuentra enriquecido en CH₄. Posteriormente el gas se seca antes de odorizarlo para introducirlo en la red de gas natural o comprimirlo para combustible para vehículos.

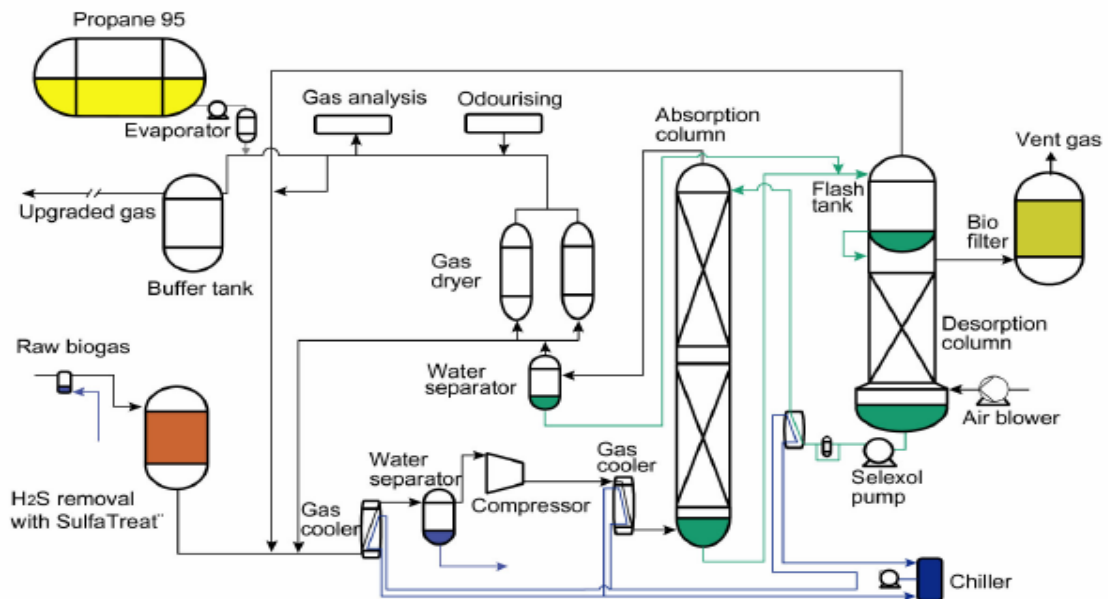


Figura 14. Esquema de la absorción con Selexol.

Como inconveniente se tiene que durante la etapa de desorción del Selexol puede formarse azufre elemental si se desorbe con aire. Otro inconveniente es que este proceso resulta más caro para aplicaciones a pequeña escala que la absorción con agua o la PSA.

1.3.3.2 Costos de inversión y consumos.

Esta tecnología también está bastante consolidada, por lo que sus costos de inversión se mantienen estables con el paso de los años. Los costos de inversión de los sistemas de absorción con solventes orgánicos disminuyen con el aumento del tamaño de la instalación, como ocurre también con las demás tecnologías. En la Figura 15 se puede comprobar la evolución del costo de inversión específico en relación a la capacidad de una planta (García, 2016).

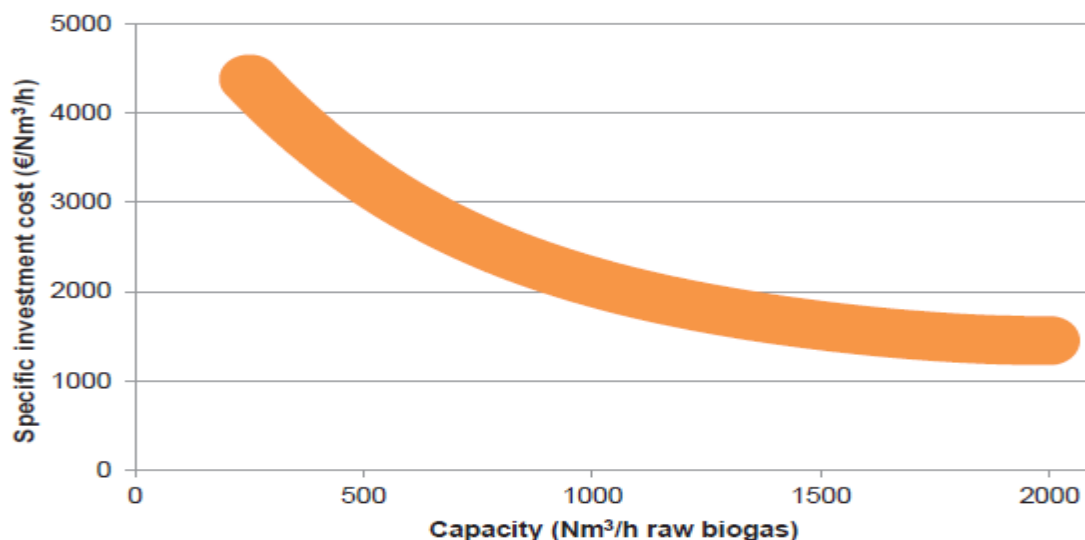


Figura 15. Evolución del costo de inversión específico en función de la capacidad de un sistema de absorción con solventes orgánicos.

El consumo de energía para valorizar el biogás con solventes orgánicos es similar a la energía necesaria para el caso de la absorción con agua, siendo también el compresor, la bomba y el enfriador los equipos que consumen la energía. En comparación con la absorción con agua, la bomba consume menos energía debido al hecho de que impulsa un caudal menor. Del mismo modo, el consumo de energía depende del tamaño de la unidad, pero no de la concentración de metano en el biogás. Este consumo se encuentra en un 0,2-0,25 kWh/Nm³ de biogás. La disponibilidad está garantizada en un 96-98 %, mientras que los costos de mantenimiento anuales son alrededor de 2-3 % del costo de inversión.

En cuanto a los tecnólogos especializados en el suministro de equipos de lavado con disolventes orgánicos para la valorización de biogás, existe un número pequeño de estos. El más importante es BMF HAASE Energietechnik GmbH, empresa alemana dedicada al tratamiento y valorización de biogás, gas de vertedero, aguas residuales y gas natural. (García, 2016)

Otra empresa especializada en el tratamiento de biogás para la obtención de biometano mediante sistemas de absorción con solventes orgánicos es Schwelm Anlagentechnik GmbH (GmbH S. A., Schwelm Anlagentechnik GmbH). Mediante el sistema desarrollado por Schwelm Anlagentechnik GmbH se consigue un biometano con más de un 98% de contenido en metano y unas

pérdidas de metano inferiores al 1 %. Tiene instalaciones repartidas por toda Alemania, como por ejemplo las de las ciudades de Zernin o Barleben. Estas plantas tratan distintos caudales nominales de biogás, desde los 200 hasta los 1 600 m³/h de biogás, dependiendo del tamaño de la planta, con consumos inferiores a 0,2 kWh/m³ de biogás (GmbH S. A., Schwelm-Biogás-Plants).

1.3.4 Absorción química.

1.3.4.1 Descripción del proceso.

La absorción química emplea disoluciones de aminas como líquidos absorbentes. En este caso, el CO₂ no solo se absorbe en la solución líquida, sino que también reacciona con las aminas. Como la reacción química es muy selectiva, las pérdidas de metano que se producirían serían muy pequeñas, por debajo del 0,1 %. Una parte de la solución de aminas se pierde por evaporación, la cual se debe reponer. La regeneración de la solución para separar el CO₂ de las aminas a las que estás unida se realiza por calentamiento con vapor donde el CO₂ regresa a la fase gaseosa. Esta regeneración es un proceso que involucra un consumo de energía muy elevado. Las aminas usadas con más frecuencia son la MEA (monoetanolamina) y la DMEA (dimetiletanolamina) (Petersson & Wellinger, 2009).

1.3.4.2 Costos de inversión y consumos.

La absorción química con aminas es una de las técnicas de valorización de biogás más empleadas en la actualidad. En la región europea, Suecia y Alemania son los países que tienen plantas de valorización de biogás en mayor número, por lo que sus plantas se dividen en función de la capacidad que presentan; 600, 900 y 1 800 Nm³/h de entrada de biogás para el caso de Suecia y 700 y 1400 Nm³/h de entrada de biogás para el caso de Alemania. Aunque tengan un caudal nominal de entrada, estas plantas se diseñan para que puedan admitir un rango de caudales de entrada, como se muestra en la Tabla 3, donde se presenta los rangos existentes para las plantas de valorización en Suecia. (García, 2016).

Tabla 3. Rango de caudales de entrada de biogás para las plantas de valorización en Suecia.

Capacidad del Biogás (Nm ³ /h)	Límite inferior (Nm ³ /h)	Límite superior (Nm ³ /h)
600	100	700
900	300	1000
1800	800	2000

En relación a los costos de inversión, existen variaciones según el tamaño, habiendo diferencias entre los sistemas más pequeños y los más grandes. En el costo de inversión la valorización del biogás incluye el transporte, la puesta en marcha, el sistema de recuperación de calor, el análisis de los equipos y una disponibilidad superior al 96 %. En la Figura 16 se puede ver la evolución del costo de inversión específico en función de la capacidad de la planta.

Figura 18. Relación entre el costo de inversión específico y la capacidad de un sistema de valorización de biogás que emplea la absorción química con aminas.

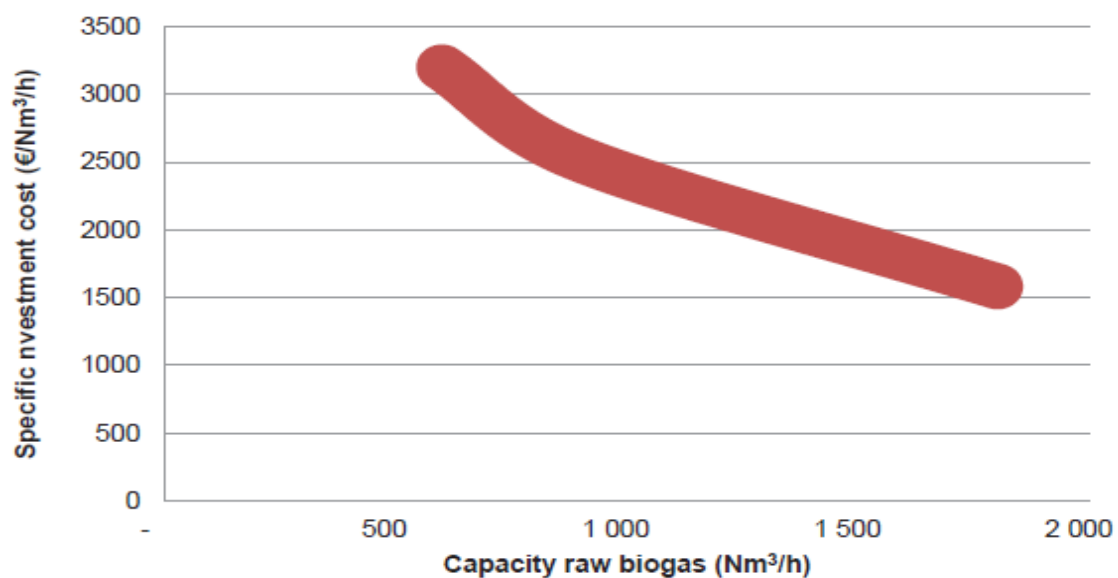


Figura 16. Relación entre el costo de inversión específico y la capacidad de un sistema de valorización de biogás que emplea la absorción química con aminas.

1.3.5 Separación con membranas.

1.3.5.1 Descripción del proceso.

Las membranas para la valorización del biogás están hechas de materiales permeables al CO_2 , al agua o al amoníaco. Parte del H_2S y del O_2 pasan a través de las membranas, mientras que el N_2 y el CH_4 pasan en una proporción muy baja, por lo que es posible la separación (Petersson & Wellinger, 2009).

Par la separación con membranas existen técnicas húmedas y secas. La técnica seca se basa en que ciertas sustancias pasan más fácilmente a través de las membranas que otras. La velocidad de paso de cada sustancia depende de la diferencia de presión parcial de cada sustancia a un lado y otro de la membrana. La presión parcial es dependiente de la permeabilidad, la cual es función de la solubilidad química de la sustancia en la membrana. Para lograr una buena separación del CO_2 la membrana debe ser selectiva para este compuesto y la diferencia de permeabilidad entre el CO_2 y el CH_4 debe ser alta (Persson M., 2003).

El diseño de las membranas hace que obtener una alta concentración de CH_4 entre en conflicto con unas pérdidas de CH_4 bajas. Incrementando el tamaño o el número de membranas se puede incrementar la concentración de CH_4 , pero al mismo tiempo las pérdidas de CH_4 se hacen mayores. Para conseguir una alta concentración de CH_4 con bajas pérdidas se debe recircular el gas rico en CO_2 obtenido en el permeado.

1.3.5.2 Costos de inversión y consumos.

En la Figura 17 se muestra de forma aproximada la relación entre el costo de inversión específico frente a la capacidad de un sistema de separación mediante membranas. El costo de inversión depende en gran medida del diseño de la planta. Los valores indicados en esta figura están referidos a plantas que han sido diseñadas para tratar una capacidad determinada de biogás, sin que puedan expandirse para incrementar su capacidad. Tampoco su incluye en costo de la limpieza del biogás, únicamente está incluida el sistema de valorización del biogás mediante membranas. (García, 2016).

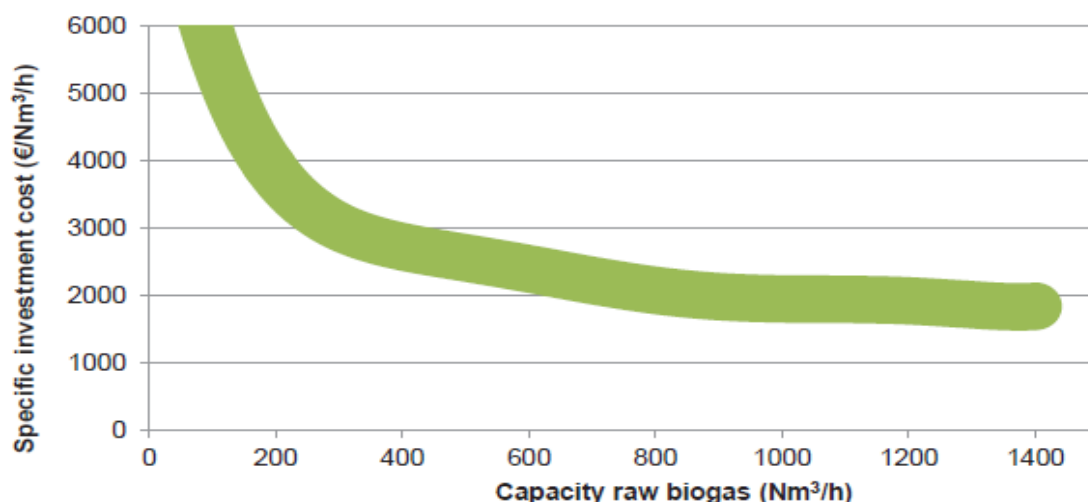


Figura 17. Relación entre el costo de inversión específico y la capacidad de las membranas.

1.5 Utilización del biogás en el transporte.

La utilización del biogás como combustible de vehículos, junto con la generación de electricidad, es de las aplicaciones con más futuro del biogás. El desarrollo actual de los biocombustibles como alternativa a los combustibles convencionales mira cada vez con mayor interés a la industria del transporte urbano, la de vehículos ligeros y pesados, donde ya es un hecho probado su aplicación y supone una interesante promesa de futuro.

El uso vehicular del biogás es posible y en la realidad se ha empleado desde hace bastante tiempo. Para esto, el biogás debe tener una calidad similar a la del gas natural, para usarse en vehículos que se han acondicionado para el funcionamiento con este combustible. La mayoría de vehículos de esta categoría han sido equipados con un depósito de gas y un sistema de suministro de gas, además del sistema de gasolina normal de combustible. El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como diesel, según se explico en el epígrafe 1.1.3.3. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, por otro lado, una desventaja es su baja velocidad de encendido. (Varnero, 2011).

Desde hace varios años existen vehículos que funcionan con gas natural. Se estima que los vehículos que utilizan este tipo de combustible emiten un 20%

menos de CO₂ (principal causante el efecto invernadero) que los vehículos que funcionan con gasolina o con gasóleo. El biogás puede sustituir al gas natural en los vehículos propulsados por este combustible, previo refinado del biogás para eliminar impurezas (CO₂, SH₂, NH₃, agua y partículas sólidas) y, de esta forma, elevar los niveles de metano hasta casi el 95 %.(Cuesta, 2006)

El empleo de biogás en automoción genera unas emisiones atmosféricas similares a las del gas natural. Sin embargo, considerando el ciclo de vida completo del biogás, las emisiones de CO₂ de éste son inferiores a las del gas natural, ya que se trata de un combustible renovable. Además, con el uso de este biocarburante en la automoción se asegura que el metano que se genera en los vertederos y en las plantas depuradoras de aguas residuales se recoja y no escape a la atmósfera.

En el año 2005, Volvo presentó un motor desarrollado específicamente para usar gas natural o biogás como combustible de automoción (principalmente para autobuses de transporte urbano). Su nombre técnico es G9A, motor de seis cilindros y 9,4 litros de cubaje que proporciona una potencia de entre 260 y 300 caballos. En los motores anteriores, se había utilizado el concepto lean burn (combustión pobre), esto es una combustión constante con una mezcla de combustible y aire superior a la estequiométrica. En cambio este tipo de motores (G9A) utiliza la mezcla estequiométrica de combustible y aire de forma constante para una combustión óptima. Esto es posible gracias a un sofisticado sistema de gestión electrónica que recibe información de los parámetros básicos del motor. Este sistema electrónico también mide la calidad del combustible suministrado para adaptar los parámetros de la combustión. (Combustible y vehículos alternativos, 2005)

En España son varias las ciudades donde ya existen vehículos que utilizan biogás, sobre todo en transporte urbano. Otros ejemplos del uso del biogás como combustible se dan en Suecia uno de los países más avanzados en este ámbito, donde funciona un tren de transporte de pasajeros usando exclusivamente biogás y los autobuses de Helsingborg (Ciudad de Suecia) funcionan con biogás obtenido a partir de residuos orgánicos.

1.6 Aplicaciones potenciales de la utilización del biogás en Cuba.

Cuba cuenta con un Movimiento de Usuarios del Biogás que promueve el desarrollo de esta tecnología como tratamiento de residuales, y además como productora de combustible y biofertilizante, además se apoya el uso de esta tecnología desde el MINAG, CITMA, Empresa de Porcino, ANAP, etc.

Se verifica un incremento del empleo de esta tecnología por parte del sector no estatal, especialmente los convenios de producción porcina. Debido a la exigencia de emplear la digestión anaeróbica como tratamiento de residuales, esta situación puede generar a su vez falta de compromiso o motivación del productor con el aprovechamiento energético del biogás obtenido. (López, 2016)

En el municipio de Martí, perteneciente a la provincia de Matanzas se ha consolidado un proyecto de intervención en el cual AquaLimpia Engineering e.K. de Alemania fue contratado por la Agencia Suiza de Desarrollo y Cooperación (COSUDE) para la construcción de dos biodigestores. La coordinación del proyecto en Cuba está a cargo de la Estación Experimental Indio Hatuey.

El proyecto MARTI I se desarrolló en una granja porcina que actualmente tiene una producción de 6 000 cerdos. Está previsto que a fines del año 2018 la producción de cerdos aumente a 10 000 cerdos. Para el tratamiento de los residuales se construyó un biodigestor tipo laguna con un volumen de 2500 m³. El proyecto MARTI II se construyó en una granja porcina que actualmente tiene una producción de 10 000 cerdos, donde está previsto aumentar la producción de cerdos hasta 15 000 unidades. Adicionalmente se aprovechan las aguas residuales que se producen en un matadero de reses y cerdos. En este proyecto está basado en un biodigestor tipo laguna de 4500 m³ de volumen. Ambos proyectos destinarán un uso final del biogás producido para la producción de electricidad con motor de combustión interna y la limpieza del biogás para la obtención de biometano con la finalidad de empleo en el transporte de pasajeros con ómnibus Skania importados desde Suecia. (Suárez et al., 2011, Hernández, 2017)

Debido al uso de esta tecnología en la actualidad se genera un potencial de biogás que no está siendo debidamente explotado como recurso energético. A pesar de las ventajas que ofrece el biogás para su utilización como combustible en motores de combustión interna, su uso en el país se ha visto limitado principalmente a su quema en fogones de gas para la cocción de alimentos y calentamiento de agua, desaprovechando las innegables ventajas que este ofrece para otras aplicaciones. Solo en lugares puntuales, y como parte casi siempre de experiencias piloto, se ha utilizado el biogás con propósitos diferentes.

Un ejemplo lo representa la Empresa Azucarera Heriberto Duquesne de Remedios, Villa Clara, la cual cuenta con una caldera, que genera 12 toneladas de vapor por hora con la utilización conjunta de biogás y petróleo. La caldera cuenta con un quemador especial que permite suplir dos toneladas diarias de diésel, por 7 000 metros cúbicos de biogás. En este caso el gas orgánico representa el 30 % de la mezcla utilizada para la combustión. Esta se logra con el empleo diario de unos 900 metros cúbicos de vinaza, un residual de la destilación de alcohol, y más de 450 de líquidos correspondientes a los desechos de la producción azucarera. Otro ejemplo de la finalidad que se le puede dar al biogás, lo constituye la Granja Porcina La Pastora en el municipio de Placetas, donde se instaló un sistema de refrigeración por absorción que utiliza el biogás obtenido de la excreta y los residuos de matadero de la granja. Además, otra de las aplicaciones que se le ha dado al biogás en el país es para la soldadura de metales, en sustitución del acetileno. Esta experiencia se ha logrado hasta el momento con biogás almacenado a altas presiones y en metales como el bronce, el cobre y el aluminio, puesto que la llama del metano no alcanza temperaturas suficientemente elevadas para su utilización en acero. No obstante se han realizado pruebas satisfactorias con el gas almacenado a bajas presiones. (Cesar A.2012)

Otro de los usos dados al biogás en el país, lo constituye su utilización como combustible en motores de combustión interna, tanto de encendido por compresión, como de encendido provocado. Aunque esta experiencia se ha realizado en varios lugares, ha estado marcada por el poco rigor científico-

técnico, y no se conocen resultados obtenidos en experimentos o pruebas de funcionamiento que se hayan realizado.

Se destaca en el país el municipio de Placetas por la producción porcina, sin embargo a pesar de hacer uso de la tecnología del biogás como principal sistema de tratamiento de residuales, tanto el manejo como el uso del biogás generado no es el más adecuado, es por ello que en la presente investigación se abordara esta temática y se propondrán soluciones técnicas a la misma.

Conclusiones parciales.

1. El biogás constituye una alternativa energética potencial a utilizar en las condiciones de Cuba, la misma es conocida en el país y es empleada a pequeña escala, sin embargo no se aprovecha actualmente el potencial energético real que esta tecnología ofrece.
2. El biogás puede ser empleado directamente o purificado en forma de biometano tanto en los motores diésel como en los de encendido por chispa y en las diferentes aplicaciones que estos tienen, destacándose la generación de electricidad y el transporte.

Capítulo II: Materiales y métodos

2.1 Evaluación del potencial de biogás de Placetas.

Placetas es un municipio cubano, conocido como “La Villa de los Laureles” por la presencia de numerosas plantaciones de árboles de Laurel en diferentes puntos de la ciudad. El municipio Placetas se encuentra ubicado en la región central de Cuba (Ver figura 18). Por su extensión territorial de 600,59 km² ocupa el sexto lugar entre los trece municipios que conforman la provincia. Limita al norte con los municipios de Camajuaní y Remedios, por el sur con los municipios espirituanos Cabaiguán y Fomento y el municipio villaclareño de Manicaragua, por el este con los municipios de Remedios y Cabaiguán y por el oeste con los municipios Santa Clara y Manicaragua. Se localiza a 30 kilómetros de la ciudad de Santa Clara, capital de la provincia Villa Clara.

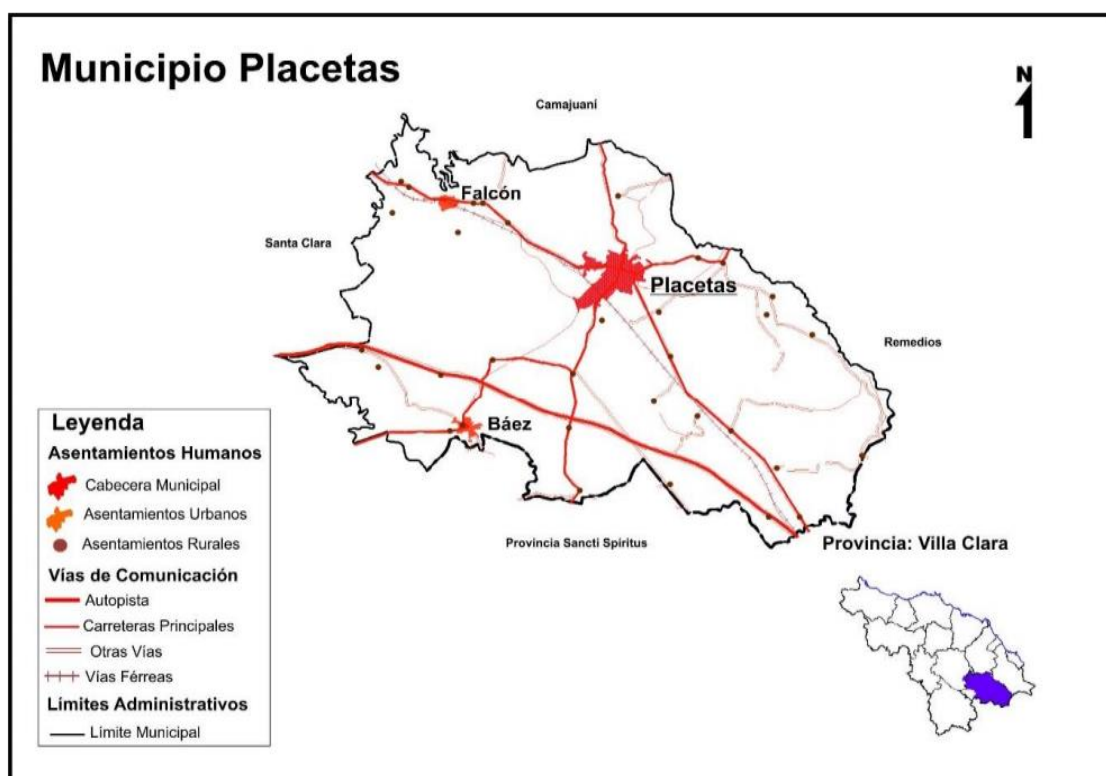


Figura 18: Municipio de Placetas en la región central de Cuba.

Desde hace varios años el municipio de mayor producción porcina en Cuba es Placetas. La cría de cerdos, es muy difundida en las comunidades campesinas por el valor económico que representa en los ingresos familiares, tiene sin

embargo negativos impactos sobre el medio ambiente, siendo los principales problemas:

- Contaminación orgánica de las fuentes de agua superficiales y subterráneas.
- Emisiones a la atmosfera de gases de efecto de invernadero como el metano y óxido nitroso, ambos con alto potencial de calentamiento.

El potencial hidráulico es significativo en esta zona al estar ubicada una de las principales cuencas de importancia en el país (Cuenca Zaza); así como otras sub-cuencas y embalses como son, el nacimiento del río Zaza cuya cuenca recorre toda la extensión territorial, convirtiéndose en un área de prioridad en materia de conservación, preservación y educación ambiental. Este municipio está constituido por una red de aguas superficiales que abarca más de 30 ríos y arroyos de corriente permanente perteneciente a las cuencas del río Sagua la Chica, río Zaza y el río Agabama. También solo una parte del municipio de Placetas posee un sistema de acueducto, siendo el suministro fundamental de agua a través de pozos, muchos de ellos se encuentran próximos donde se desarrolla la producción porcina.

Otro de los grandes problemas que existe en la comunidad, son las quejas de los vecinos, en relación a los malos olores y a la contaminación de sus aguas por las excretas que se vierten, y el peligro de transmisión de enfermedades a la población, agravada esta situación en épocas de lluvia al estar expuesta las excretas porcinas a contaminar fuentes de abasto de agua primaria, por lo que se exige una mejor higiene para todos.

Actualmente el municipio de placetas cuenta con tres modalidades de convenios porcinos:

- ✓ Convenio ceba comercial.
- ✓ Convenio de reproductoras.
- ✓ Convenio ceba propia.

De estas modalidades de convenios son verdaderamente cuantificables las dos primeras ya que la modalidad de ceba propia está orientada a los productores

independientes que se presentan en la entidad a acopiar sus ejemplares sin un convenio previo que registre el número de animales que esto tienen, por lo tanto la determinación del número de animales presentes en las instalaciones porcinas de Placetas en el presente trabajo se basara en las estadísticas de la UEB Porcina de Placetas.

La cuantificación del número de cerdos en las instalaciones porcinas en el periodo de estudio resulta indispensable para la estimación del potencial de biogás de la región. Según los datos reportados por la empresa en el periodo enero-agosto del presente año (2018), son los mostrados en la figura 19.

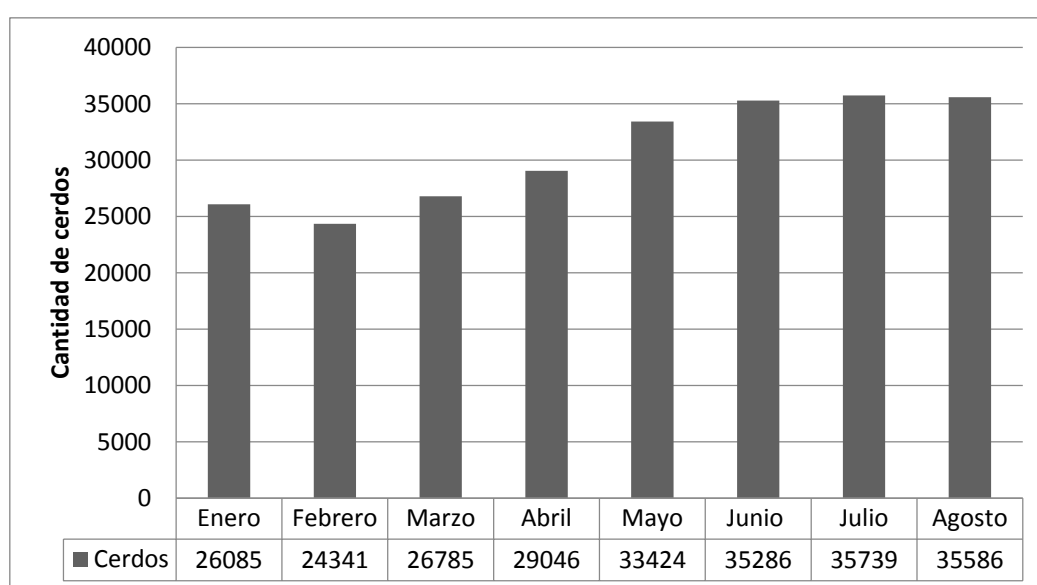


Figura 19. Número de cerdos reportados por la UEB porcina Placetas, 2018.

2.1.1 Determinación del potencial del biogás en Placetas.

En comunicación personal con José Ramírez González, director de la Unidad Empresarial de Base Porcina del municipio Placetas y en aras de lograr una adecuada estimación del potencial de producción de biogás en placetas, se define por parte del directivo una presencia de cabezas de ganado porcino de aproximadamente 30 000, cifra que se prevé mantener en próximos años y que posteriormente se pretende aumentar. A su vez este especialista refiere que esta cifra resulta idónea para los cálculos ya que en esta empresa la misma representa un valor que puede ser sostenido en el tiempo, aun así en la presente investigación, teniendo en cuenta la variabilidad mostrada en el periodo enero-agosto, se toman como escenarios de estudio, además de los

30000 cerdos un número de cerdos inferior y superior al mismo, estos valores fueron de 25 000 y 35 000 cerdos respectivamente.

Para la estimación del potencial de biogás a partir del número de cerdos del municipio de Placetas, se emplea el Software RETScreen, versión cuatro Plus.

En el mismo se introduce la data referida a la cantidad y tipo de animales y se define un peso promedio de 50 kg. Y a partir de estos datos de entrada el mismo calcula la cantidad de biogás producida para un contenido de metano del 68 %, valor prefijado por el programa cuando el potencial es derivado de los residuos porcinos.

El contenido de metano puede mejorarse llegando a tener hasta un 90% con los procesos de purificación tratados en el capítulo 1, obteniéndose como producto final el biometano.

2.2 Caracterización del sistema de transportación en los municipios de Santa Clara y Placetas. Determinación de la demanda energética.

En el municipio de placetas existe una red vial bien conformada para el transporte urbano. El municipio está atravesado por la carretera Central y por la Autopista, además también por el Vial Nacional Ferroviario. Existe un puente elevado que facilita la circulación tanto vial como ferroviaria con una simplificación y mejoramiento del flujo peatonal y vehicular. Además existen las instalaciones necesarias para el mantenimiento y reparación de los vehículos de transporte urbano ya sean ómnibus y taxis pero hay carencia de ómnibus para el transporte urbano, además del déficit de combustible existente. (Pedraza, 2010)

La movilidad interna dentro de la cabecera se basa fundamentalmente en coches de tracción animal y de bicitaxis al no existir rutas de guaguas ni taxis para la movilidad dentro de la cabecera municipal.

Respecto al transporte por ómnibus en la Terminal Municipal hacia otros municipios hay que destacar, la comunicación existente con Santa Clara y Fomento, con más de cuatro viajes diarios, además de Zulueta, Cabaiguán y Camajuaní, con al menos dos viajes diarios tres veces a la semana. En el municipio también hay varios taxis, camiones y camionetas particulares que

tienen varios viajes fundamentalmente hacia Santa Clara, y en menor medida a Zulueta, Cabaiguán y Fomento, además de camiones, camionetas entre otros procedentes de Sancti Spíritus que apoyan el traslado a la ciudad de Santa Clara, Falcón, y demás. (Pedraza, 2010)

La comunicación interna de la cabecera municipal con los demás asentamientos que de esta dependen, excepto con Báez que presenta cinco viajes diarios y Falcón que se beneficia con los de Santa Clara, es deficitaria, pues hacia los demás solo hay dos viajes, en ese caso están: Nazareno, Valdespino, Plata, Cacique, Máximo, Sabanilla y Cuatro Caminos. Para Tibisial, Porvenir, y la Siguapa los viajes están cancelados por el estado de las carreteras, para los demás asentamientos apenas hay viajes. (Pedraza, 2010)

Con vista a definir el comportamiento del servicio de transporte de pasajeros en ómnibus en los municipios de Placetas y Santa Clara para futuros estudios que pretenden evaluar la posibilidad de suplir el combustible consumido en este servicio por el biogás producido en el municipio de Placetas, derivado de la producción porcina. Se procedió con la recopilación referida al número de viajes y frecuencia de los mismos, las rutas a realizar por tipo de vehículo y combustible consumido para un mes tipo, por tal motivo en el presente trabajo solo se presenta la información de un mes tipo para los municipios de santa clara y placetas ya que los mese de transportación se repiten en el año. (Ver tablas 4, 5, 6 y 7).

Tabla 4.Cumplimiento del plan de viajes y pasajeros para un mes tipo en Placetas.

Origen-Destino	Viajes		Pasajeros		Valor \$		Km Recorridos según plan
	Plan	Real	Plan	Real	Plan	Real	
Plac.H-Almejei	92	84	3036	2884	1527	1120	624
Plac- B. Juárez	128	80	4776	3106	2166	716	242
Plac- Cumbre	92	70	3036	2368	1398	230	560
Plac-C.Serviá	92	80	3036	2732	1619	1113	684
Plac-Nazareno	36	36	1188	1247	598	563	564
Báez-Placetas	186	134	19344	13936	10862	5781	3561
Báez-Placetas	124	124	5456	14500	3149	6412	2394
Plac-Zulueta	92	84	3036	2884	1766	1662	1124
Total	842	692	39872	43657	24085	17597	9753
Plac-S. Clara	170	170	9706	23294	11560	29449	3080
Plac-S. Clara	92	2	9200	460	10120	17.00	3080
Plac-S. Clara	32	14	1600	720	1824	885	1208
Plac. Cabaiguán	46	46	2300	2415	2626	1751	1760
Plac. Camajuaní	92	18	6072	1518	3827	653	1644
Total	432	250	28878	28407	29957	32755	10772
Plac-Plata	56	20	3192	1277	1288	339.9	1132.8
Plac-Cacique	56	14	3192	958	1232	178.2	988.8
Plac-Máximo	56	50	3304	3138	985	639.9	568.8
Plac-Camajuaní	92	18	6072	1518	3827	653.7	1644
Plac-Sabanilla	56	56	3304	5617	1456	1895	1243.2
Plac-T.sabanilla	36	36	2376	5227	1008	2609	1113.6
Plac-Tibisal	36	34	2052	2031	720	685.8	744
Plac-Siguapa	36	20	2052	1231	720	366	811.2
Plac-4 Caminos	56	56	3640	3822	1400	923.8	921.6
Plac-Valdespin	56	28	3640	2002	1960	865.9	2104.8
Báez-S.Clara	36	16	2376	1056	1440	68	1300.8
Báez-Fomento	56	52	3248	3016	1030	1343	813.6
Báez-Agabama	52	24	3640	1630	1300	882	1329.6
Total	680	424	42088	32523	18326	11450	14716.8

Tabla 5. Descripción de los consumos de combustible por tipo de vehículo empleado en la transportación en el municipio Placetas para las diferentes rutas reportadas por transporte provincial.

Origen-Destino	Vehículo	Consumo diario (L)		Consumo mensual (L)		Índice de consumo (Km/l)	
	Modelo	Gas	Dies	Gas	Dies	Gas	Dies
Plac.H-Almejei	5016(GVI D)		6.9		159.5		4.50
Plac- B. Juárez	5087(GXVII)		4.5		103.5		2.69
Plac- B. Juárez	5006(GVI)	4.8		43.6		2.5	
Plac- Cumbre	5006(GVI)	11.2		246.4		2.5	
Plac-C.Serviá	5006(GVI)	13.7		301.0		2.5	
Plac-Nazareno	5017(GVI)	28.2		254.2		2.5	
Báez-Placetas	5121(GVI)	35.5		1099.5		2.25	
Báez-Placetas	Super Bus		44.6		1382.9		2.66
Plac-Zulueta	5016(GVI D)		12.5		387.2		4.50
Total		93.4	68.5	1944.7	2032.9		
Plac-S. Clara	5080(GXVII)		34.4		1067.3		2.28
Plac-S. Clara	5002(S.Bus)		83.2		1914.6		1.85
Plac-S. Clara	5071(GVI)		39.7		357.6		3.8
Plac. Cabaiguán	5015(GVI)	39.1		860.4		2.3	
Plac. Camajuaní	5008(Semi)		27.4		629.9		3.00
Plac-Medibus	5010 Diana		24.2		532.9		4.5
Total		39.1	210	860.4	4502.3		
Plac-Plata	5005(GVI)		21		293.7		4.50
Plac-Cacique	5004(CGas-53)		18.3		238.0		4.50
Plac-Máximo	5017(GVI)	19.0		246.5		2.5	
Plac-Camajuaní	5008(Semi)		27.4		629.9		3.00
Plac-Sabanilla	5001(GVI)		23.0		299.3		4.50
Plac-T.sabanilla	5007 CZIL130		46.4		417.6		3.00
Plac-Tibisal	5003(Gaz 66)		20.7		186.0		4.50
Plac-Siguapa	5004(CGas-53)		22.5		202.8		4.50
Plac-4 Caminos	5024 (GVI)	34.1		443.3		2.25	
Plac-Valdespin	5056(GVID)		39.0		506.7		4.50
Báez-S.Clara	5101(GVI)		36.1		289.1		4.50
Báez-Fomento	5103(GVI)	30.1		421.9		2.25	
Báez-Agabama	5106(Cinetruc)		38.2		305.7		2.90
Total		83.2	293	1111.7	3368.8		
Total Placetas		216	572	3916.8	9904		

Tabla 6: Cumplimiento del plan de viajes y pasajeros para un mes tipo en Santa Clara.

Origen-Destino	Viajes		Pasajeros		Valor \$		KM recorrido según plan
	Plan	Real	Plan	Real	Plan	Real	
Sake-Guamajal	2900	2900	493000	612000	162500	177400	24600
J.M-Arco Iris	1500	1500	255000	323000	50700	85400	17220
Mercado-UCLV	3800	3300	646000	629000	98700	98700	36480
Parque-Sake	1300	1000	221000	187000	40900	35300	9516
J.M-Sake	2900	2800	493000	493000	125100	139800	29808
Pedago-Sake	700	500	114000	136000	29700	9900	5280
Total	13100	12000	2222000	2380000	507600	546500	122904
J.M-J.Fco Aro	900	900	40300	39600	65600	41000	20790
J. M-Yabú	900	700	40300	30800	24800	24000	18900
J. M-Hatillo	300	300	13400	26400	12000	25400	6598.8
Parq-Soler(aut)	100	100	4400	4400	1200	2900	3753
J. M-Minerva	600	500	26800	22000	8500	21400	16740
J. M-Manajanab	600	600	26800	26400	27900	29400	13920
J. M-Boqueron	300	300	13400	13200	15500	14500	4110
A. Díaz-Sakenaf	4800	2500	215500	11000	34100	133900	67056
Base-Chichi Pa	1100	900	49200	39600	55800	33500	24930
J. M-Circunvala	1000	400	44700	17600	44700	12900	2182.2
Sake-Planta M	1100	600	49200	26400	11500	27800	15282
Total	11700	7800	524000	356400	301600	366700	194262
J.M-Suazo	2000	2000	15500	15400	6100	8300	6930
Parque-Soler	2000	2000	15500	15400	5600	6400	3753
Total	4000	4000	31000	30800	11700	14700	10683
Total	28800	23800	2777000	2767200	820900	927900	327849

Tabla 7. Descripción de los consumos de combustible por tipo de vehículo empleado en la transportación en el municipio Santa Clara para las diferentes rutas reportadas por transporte provincial.

Origen-Destino	Vehículo	Consumo diario (L)		Consumo mensual (L)		Índice de consumo	
	Modelo	Gas	Dies	Gas	Dies	Gas	Dies
Sake-Guamajal	Diana		222		6 896		3.69
J.M-Arco Iris	Diana		156		4 826		3.69
Mercad-Univer	Diana		330		10 216		3.69
J.M-Univer	M- Benz		240		5520		2.10
Parque-Sake	Diana		86		2 665		3.69
J.M-Sake	Diana		269		8 347		3.69
Pedago-Sake	Diana		48		1 479		3.69
Total			1 351		39 949		
J.M-J.Fco Aro	Diana		125		3 881		3.69
J.M-J.Fco Aro	M- Benz		87		2 266		2.65
J. M-Yabú	Diana		171		5 293		3.69
J. M-Hatillo	M- Benz		47		1 457		2.60
J. M-Hatillo	M- Benz		47		1 128		2.60
Parq-Soler(aut)	Diana		11		259		3.69
J. M-Minerva	Diana		76		2 344		3.69
J. M-Minerva	M- Benz		107		2 575		2.60
J. M-Manajanab	Diana		63		1 509		3.69
J. M-Manajanab	M- Benz		89		2 766		2.60
J. M-Boqueron	M- Benz		53		1 633		2.60
A. Díaz-Sake	Diana		621		19 248		3.60
Base-Chichi Pa	Diana		144		4 330		3.69
J. M-Circunvala	Diana		27		833		3.69
Sake-Planta M	Diana		138		4 280		3.69
Total			1 806		53 802		
J.M-Suazo	Diana		64		1 941		3.69
Parque-Soler	Diana		34		1 051		3.69
Total			98		2 992		
Total general			3 015		96 743		

Como se puede apreciar en las tablas 5 y 7, los consumos mensuales de gasolina y diésel en Placetas son de 3 916,8 litros y 9 904 litros respectivamente y se pudo corroborar un comportamiento muy similar en los registros de otros meses del presente año, ya que como se había mencionado,

el plan de transportación mensual es similar durante el año. En el caso de Santa Clara, el parque automotor destinado al transporte público no cuenta con motores de ciclo Otto y el consumo de diésel fue de 96 743 litros, este es significativamente superior al de Placetas ya que los recorridos son más largos y el número de rutas y viajes muy superior.

El municipio de Santa Clara cuenta actualmente con ciento veintitrés ómnibus Diana y se pretenden entregar al municipio antes que culmine el año 2018 doce ómnibus más, para de esta forma cumplir con la estrategia de aumentar el parque de equipos según las asignaciones del ministerio para lograr la eficiencia en el transporte de pasajeros de la ciudad de Santa Clara y satisfacer las necesidades de la población. Y la tendencia en el país es incrementar la producción de este tipo de ómnibus, que ha demostrado con su robustez una mejora en el servicio de transportación.

2.3 Evaluación del aprovechamiento energético del biogás en el transporte urbano en los municipios de santa Clara y Placetas.

Para evaluar la posibilidad de emplear el biogás procedente de los convenios porcinos de placetas, se asume que la producción de este biocombustible esta de manera centralizada, lo cual en la práctica no ocurre de este modo ya que los actuales convenios están distribuidos en el territorio del municipio, principalmente asociados a diferentes UBPC. Esta suposición está fundamentada en estudios anteriores realizados por el Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA), el cual en el estudios de alternativas de aprovechamiento energético del biogás propone indistintamente del uso final, una solución que considera utilizar los convenios como sistemas que almacena o colectan los residuales y transportar estos a uno o varios digestores ubicados según la logística de esta actividad que depende en gran medida de la micro-localización de los convenios y el número de cabezas de ganados contratados por los mismos.

De esta manera, para el caso del empleo del biogás en el transporte urbano, se ubicaría la planta de transformación del biogás en biometano en las proximidades al área de digestión anaerobia y se organizaría la logística de la actividad de explotación del parque de ómnibus en función de la estación de

servicio de biometano, la cual puede estar cercana a la planta o distante si se pretende transportar el biometano hacia ella.

Para este tipo de estudio por su carácter preliminar y teniendo en cuenta que no se conoce el índice de consumo de gas en función de los kilómetros recorridos del motor seleccionado, se pretende analizar la relación entre la disponibilidad de biogás y la demanda energética del transporte de Santa Clara y Placetas a partir del poder calorífico de los combustibles implicados, gasolina, diésel y biogás (42.5 MJ/kg, 44 MJ/kg y 22 MJ/ kg respectivamente). El estudio realizado está basado en los consumos de combustible mostrados en las tablas 5 y 7, y se realizó el análisis teniendo en cuenta el consumo diario. Es preciso señalar que en el motor el rendimiento alcanzado con biometano es muy similar al desarrollado con los combustibles fósiles y con una ligera tendencia a incrementarse , reportándose por el fabricante un consumo máximo de biometano de 210 g/kWh.

Durante el estudio se priorizó el municipio de Placetas al cubrir su demanda en la transportación de pasajeros y se analizó la posibilidad de cubrir parte de la demanda de este servicio en la ciudad de Santa Clara, en tres escenarios productivos del sector porcino, cuando el número de animales existente en Placetas es de 25 000, 30 000 y 35 000 cerdos.

2.4 Estudio de la posibilidad de sustitución del motor actual (YC4E (4110)-20) del ómnibus Diana por el motor del propio fabricante a gas (YC4G180N-30)

Debido a que el mayor consumo de combustible por concepto de transportación en las ciudades estudiadas es el combustible diesel, fundamentalmente por el empleo de los ómnibus Diana y teniendo en cuenta que este tipo de ómnibus se fabrica en nuestro país, importando las partes componentes como es el caso del motor Yuchai YC4E (4110)-20, del cual se muestran sus datos técnicos en la tabla 8. Es que se decide en la presente investigación evaluar la posibilidad de sustitución de este motor por uno del propio fabricante que además se sugiere por parte del proveedor su uso en ómnibus, del modelo Yuchai YC4G180N-30, cuya información técnica se muestra en la tabla 9.

Tabla 8: Datos técnicos del motor Yuchai YC4E (4110)-20.

Motor	Yuchai YC4E(4110)-20
Combustible	Diésel
Cilindrada	4.257 Litros
Números de Cilindros	4
Configuración	En línea
Válvulas por cilindros	2
Diámetro x Carrera	110 x 112 mm
Potencia máxima a rpm	110 Kw a 2600 rpm
Par máximo a rpm	490 N-m a 1400-1600 rpm
Velocidad Máxima	110Km/h
Consumo de combustible a máxima carga	215 g-kwh

Tabla 9. Datos técnicos del motor Yuchai YC4G180N-30.

Configuration	Vertical, in-line, 4 stroke, water-cooled, single-point injection	
Number of Cylinders	4	
Displacement (L)	5.2	
Bore x Stroke (mm)	112×132	
Aspiration	Turbocharged, inter-cooled	
Fuel System	ECI	
Fuel	CNG (Compressed Natural Gas)/LNG (Liquefied Natural Gas)	
Rated Power /Speed (kW/r/min)	132/2300	
Peak Torque Speed (N.m/r/min)	650/1400	
Min. gas consumption with full load (g/kW.h)	≤210	
Noise (ISO3744) dB(A)	≤93	
Emissions	Euro 3	Euro 4
Dry Weight (kg)	450	
Application	7.8-9m urban buses,coaches	

2.4.1 Metodología de cálculo de tracción del motor Yuchai YC4G180N-30, como elemento motriz del ómnibus Diana.

La metodología empleada para el cálculo de remotorización del ómnibus Diana es la empleada en el plan de estudio de la carrera de Ingeniería mecánica, específicamente en la asignatura Máquinas Automotrices, la misma se detalla a continuación:

Características del automóvil

Tabla 10. Dimensiones del Ómnibus Diana.

Dimensiones Exteriores	
Largo (mm)	4110
Ancho(mm)	1620
Alto(mm)	2350

Cálculo del peso del vehículo

El peso del vehículo está ligado directamente a la potencia que consume el motor, además de estar relacionados también la capacidad de carga y los pasajeros.

Para esto asumimos el cálculo del peso total del vehículo en las condiciones extremas de carga.

La ecuación para el cálculo del peso del vehículo es:

$$G = G_a + G_0$$

$$G_0 = G_r + m(\xi_1 + \xi_2)$$

$$G = G_a + G_r + m(\xi_1 + \xi_2)$$

En donde:

G_a – Peso propio del vehículo

G_0 – Carga útil

G_r – Capacidad de carga.

m – Cantidad de pasajeros (se incluye el chofer)

ξ_1 – Peso por cada pasajero, se asume 75 kg

ξ_2 – Peso del equipaje por cada pasajero, se asume 15 kg

Para saber cuan racional estamos utilizando el peso del vehículo despejamos

$$\eta_G = \frac{G_a}{G_r} \text{ ó } \eta_{G'} = \frac{G_a}{m}$$

Donde η_G es la relación entre el peso del vehículo entre las toneladas cargadas para camiones y varía entre 600÷1200 kg/t. Para vehículos de pasajeros varía entre 200÷400 kg/pasajeros y se asume como $\eta_{G'}$

Neumáticos y radio dinámico

Conocido ya los neumáticos que lleva nuestro vehículo procedemos a calcular el radio dinámico.

Mediante la expresión:

$$r_k = \frac{D}{2} + B(1 - \lambda)$$

En donde:

D – diámetro de la llanta

B – Ancho entre la llanta y el borde exterior del neumático

λ – Coeficiente de deformación radial del neumático (0,13 para vehículos ligeros)

En caso de no conocer los neumáticos calculamos la fuerza que se ejerce sobre cada uno de ellos y seleccionamos uno que pueda soportar dicha carga.

Potencia a velocidad máxima

La potencia a velocidad máxima se calcula mediante la expresión siguiente:

$$N_v = \left(G \cdot \psi + \frac{KFV^2}{13} \right) \frac{V_{máx.}}{270\eta_m}$$

En donde:

f – Coeficiente de resistencia al camino

K – Coeficiente aerodinámico del vehículo

F – Área frontal del vehículo

η_m – Rendimiento de la transmisión de fuerza

$V_{m\acute{a}x}$ – Velocidad máxima del vehículo

Esta ecuación está ajustada para un ángulo de inclinación de cero grados.

Potencia máxima desarrollada por el motor

$$N_{m\acute{a}x.} = \frac{N_v}{c_1 \left(\frac{n_v}{n_N} \right) + c_2 \left(\frac{n_v}{n_N} \right)^2 - c_3 \left(\frac{n_v}{n_N} \right)^3}$$

En donde:

n_v – Velocidad máxima del motor (rpm)

n_N – Velocidad a potencia máxima (rpm)

Si desconocemos alguna de estas dos velocidades la podemos hallar por la siguiente ecuación.

$$\left(\frac{n_v}{n_N} \right) = 1,1 \div 1,2$$

Tabla 11. Valores de los coeficientes.

Tipo de motor	c_1	c_2	c_3
Gasolina	1	1	1
Diesel de 2 tiempos	0.87	1.113	1
Diesel de 4 tiempos	0.53	1.56	1.09

Coeficiente de revoluciones

El coeficiente de revoluciones es la relación entre el número de revoluciones del motor con velocidad máxima y la velocidad máxima. La fórmula es:

$$\eta_n = \frac{n_v}{V_{m\acute{a}x}}$$

Marchas del vehículo

En caso de desconocerlas podemos hallarlas por las ecuaciones:

Relación de transmisión principal

$$i_o = 0,377 \frac{r_k \cdot n_v}{V_{máx}} = 0,377 \cdot r_k \cdot \eta_n$$

Para las transmisiones de primera hasta cuarta se calcula la marcha en primera:

$$i_I = \frac{G \cdot r_k \cdot \sin \alpha_{máx.}}{M_{máx.} \cdot i_o \cdot \eta_m} \cdot \varphi = \frac{G \cdot r_k \cdot \varphi}{M_{máx.} \cdot i_o \cdot \eta_m}$$

En donde:

$M_{máx}$ – Momento torsor máximo

φ – Coeficiente de adherencia al camino

$\alpha_{máx}$ – Ángulo de inclinación máximo del camino

Y luego el resto de las velocidades se calculan como se especifica en la siguiente tabla (Tabla 12).

Tabla 12. Cálculo de las marchas del automóvil.

Marcha	Caja de Velocidades		
	De 3 escalones	De 4 escalones	De 5 escalones
1ra	i_I	i_I	i_I
2da	$\sqrt{i_I}$	$\sqrt[3]{i_I^2}$	$\sqrt[4]{i_I^3}$
3ra	1	$\sqrt[3]{i_I}$	$\sqrt[4]{i_I^2}$
4ta	-	1	$\sqrt[4]{i_I}$
5ta	-	-	1

Momento torsor máximo

El momento torsor máximo en caso de no tenerse se puede calcular por la siguiente relación:

$$e_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{M_N}$$

Donde e_M es el índice de elasticidad del torque y toma valores para:

Motores de gasolina: $1,1 \div 1,3$

Motores diésel: $1,05 \div 1,15$

$$M_N = 716,2 \frac{N_{m\acute{a}x}}{n_N}$$

Velocidades lineales de traslación del vehículo

Las velocidades para cada marcha se calculan por la siguiente expresión:

$$V_{m\acute{a}x} = 0,377 \frac{r_k \cdot n_v}{i_o \cdot i_K}$$

Donde i_K son los valores de transmisión para cada marcha.

Balance de potencia del vehículo.

$$N \cdot \eta_m = N_f + N_w$$

Características dinámicas.

Las características dinámicas se calculan por las siguientes ecuaciones:

$$D = \frac{P_k - P_w}{G}$$

$$P_k = \frac{M \cdot i_o \cdot i_{kn} \cdot \eta_m}{r_k}$$

$$P_w = \frac{K \cdot F \cdot V^2}{13}$$

Conclusiones parciales.

1. Existe un alto potencial de biogás generado en Placetas a partir de los residuales porcinos con un poder calorífico inferior aproximado de 22 MJ/m³ que este en función de su contenido de metano, sin embargo este no está siendo adecuadamente empleado desde el punto de vista energético.
2. La demanda energética mensual del servicio de transporte urbano de los municipios de Santa Clara y Placetas es de 96 743 litros y 9 904 litros de diésel respectivamente y de 3 916 de gasolina solo para el caso de Placetas. El servicio de transporte de Santa Clara está basado fundamentalmente en el uso de ómnibus Diana y estos también se emplean en Placetas pero en un menor grado. En ambos municipios el combustible fósil empleado provoca que el servicio de transportación de pasajeros sea vulnerable a la afectación que sufren los precios del petróleo y la disponibilidad del mismo en el país.
3. La alternativa a estudiar, relacionada con la sustitución del motor Yuchai YC4E (4110)-20 original por el motor a gas Yuchai YC4G180N-30, resulta atractiva ya que se intercambian motores ofrecidos por un mismo fabricante, de parámetros técnicos muy similares y se pretende realizar esta modificación en una línea de ómnibus que se producen en el país y que está previsto un crecimiento en su fabricación.

Capítulo III. Análisis y discusión de los resultados.

3.1 Evaluación del potencial de biogás de Placetas.

Para este estudio se evalúan tres escenarios donde se calcula la cantidad de biogás anual producido en Placetas mediante el Software RETScreen, para 25000 cerdos (Escenario 1), 30 000 cerdos (Escenario 2) y 35 000 cerdos (Escenario 3). Los resultados obtenidos se presentan en las tablas 13, 14 y 15.

Tabla 13: Cálculo del la cantidad de biogás generado por medio del Software RETScreen para el escenario 1.

Unidad	Peso promedio por unidad kg	Cantidad	Material seco %	Material seco - sólidos volátiles %	Factor de producción de biogas m ³ /kg	Producción de biogas - anual m ³	Contenido de metano %
Cerdo	50	25.000	7,0%	100,0%	0,69	1.253.061	68%
Definido por el usuario						0	
Definido por el usuario						0	
Total		25.000				1.253.061	68%

Los resultados del Software RETScreen para el primer escenario donde se dispone de una cantidad igual a 25 000 cerdos y teniendo en cuenta un peso promedio de 50 Kg se obtiene una producción de biogás anual de 1 253 061 m³ con un contenido de metano de 68%. Donde esa producción anual equivale a una producción mensual de 104 422 m³ y una producción diaria de biogás de 3481 m³.

Tabla 14: Cálculo de la cantidad de biogás generado por medio del Software RETScreen para el escenario 2.

Unidad	Peso promedio por unidad kg	Cantidad	Material seco %	Material seco - sólidos volátiles %	Factor de producción de biogas m³/kg	Producción de biogas - anual m³	Contenido de metano %
Cerdo	50	30.000	7,0%	100,0%	0,69	1.503.673	68%
Definido por el usuario						0	
Definido por el usuario						0	
Total		30.000				1.503.673	68%

En el caso del segundo escenario, correspondiente a 30000 cerdos, el cual se considera el escenario más probable, según comunicación con especialistas de la UEB Porcino Placetas. Los resultados aportados por el Software, teniendo en cuenta además un peso promedio de 50 kg, arrojan que la producción de biogás anual es de 1 503 673 m³ que es igual a una producción de biogás mensual de 125 306 m³ y una producción de biogás diaria de 4 176 m³.

Tabla 15: Cálculo de la cantidad de biogás generado por medio del Software RETScreen para el escenario 3.

Unidad	Peso promedio por unidad kg	Cantidad	Material seco %	Material seco - sólidos volátiles %	Factor de producción de biogas m³/kg	Producción de biogas - anual m³	Contenido de metano %
Cerdo	50	35.000	7,0%	100,0%	0,69	1.754.285	68%
Definido por el usuario						0	
Definido por el usuario						0	
Total		35.000				1.754.285	68%

Para el escenario 3, correspondiente a 35 000 cerdos, teniendo en cuenta un peso promedio de 50 kg, la producción de biogás anual de 1 754 285 m³ que

es equivalente a una producción de biogás mensual de 146 190 m³ y a una producción de biogás diaria de 4 873 m³.

3.2. Evaluación del aprovechamiento energético del biogás en el transporte urbano en los municipios de Santa Clara y Placetas.

Para este análisis como se explico anteriormente en el epígrafe 2.3, se tienen en cuenta los consumos diarios de combustible a partir de los datos mensuales aportados por la Dirección Provincial de Transporte de Villa Clara, y se procedió a calcular la energía necesaria para los servicios de trasportación de Santa Clara y Placetas. A su vez se realizo el cálculo de la de la energía disponible a partir del biogás producido para los tres escenarios antes descritos y se realizo un balance entre la demanda y la disponibilidad de energía de manera que este permitió definir cuanto biogás en términos energéticos quedo disponible para el municipio de Santa Clara luego de cubrir la demanda del municipio Placetas.

Como se puede apreciar en la figura 20 la demanda energética diaria del transporte en Placetas, calculada a partir de los consumos de gasolina y diésel, resulto ser de 16 460 MJ y esta se suple perfectamente en los tres escenarios evaluados, quedando un excedente que se empelará entonces en el servicio de trasportación de Santa Clara, los valores de disponibilidad energética para Santa Clara son de 60 115,95 MJ, 75 412 MJ y 90 746 MJ correspondientes a los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente.

Y en el caso de Santa Clara la demanda energética correspondiente al consumo de diesel es de 116 349 MJ, y teniendo en cuenta la disponibilidad de biogás resultante de los tres escenarios, luego de cubrir la demanda de placetas. Se logra cubrir la demanda de Santa Clara en un 51,67 %, 64,82 % y 78 % para el caso de los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente. Los valores del diesel necesario para cubrir la demanda se observan en la columna C de la figura 21 para cada uno de los escenarios estudiados.

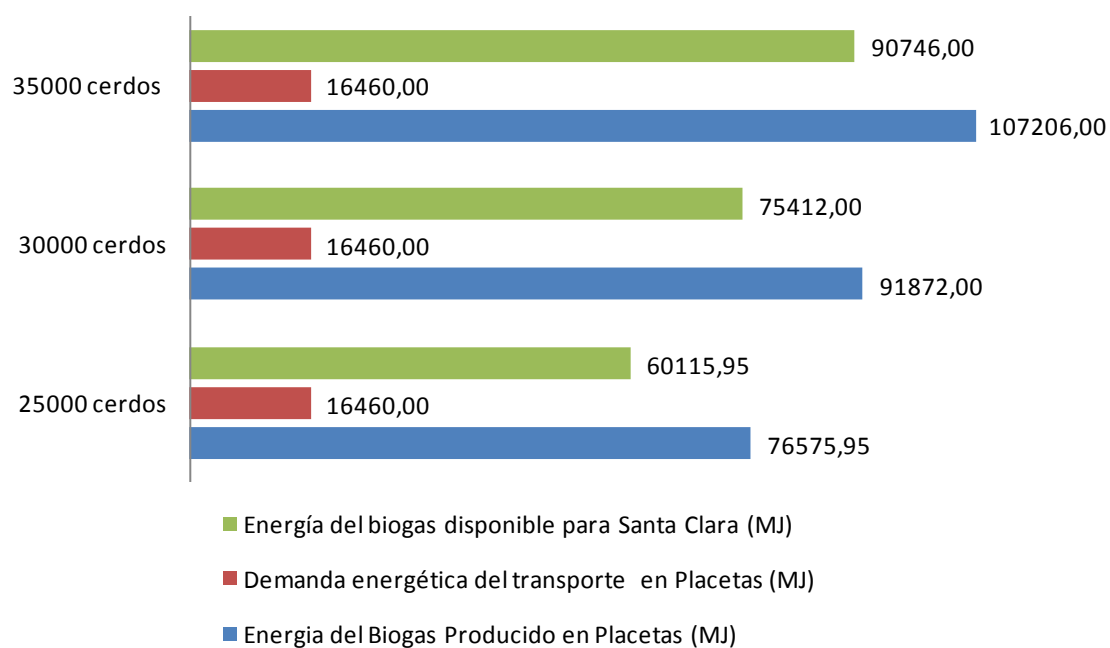


Figura 20. Balance entre la disponibilidad de biogás y la demanda energética del transporte urbano en placetas en los tres escenarios.

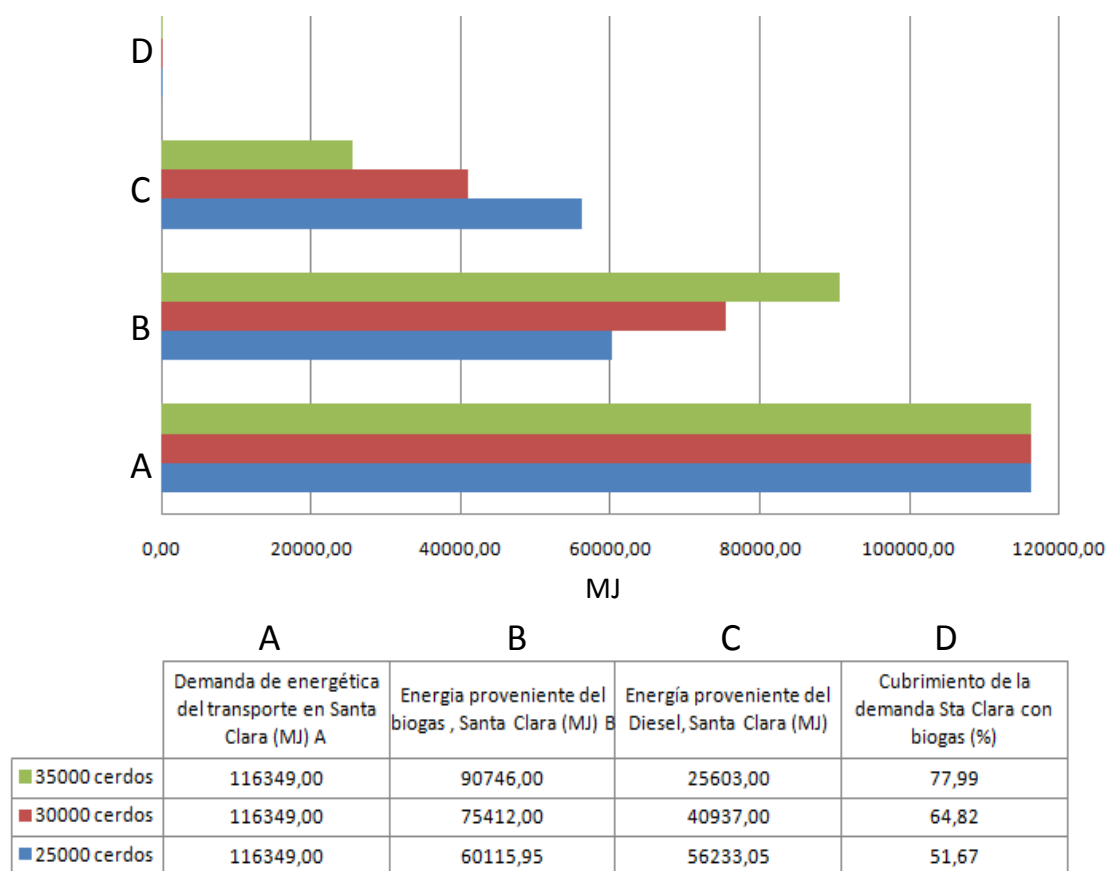


Figura 21. Balance entre la disponibilidad de biogás luego de cubrir la demanda de Placetas y la demanda energética del transporte urbano en Santa Clara en los tres escenarios.

Como se puede apreciar, los resultados conllevan a definir por parte de la Dirección Municipal de Transporte de Santa Clara, según las prioridades de las rutas y números de viajes en la ciudad, aquellos servicios que se priorizarían con ómnibus Dianas equipadas con motor a gas y cuales se mantendrían con la utilización de combustible diesel.

3.3. Estudio de la posibilidad de sustitución del motor actual YC4E (4110)-20 del ómnibus Diana por el motor del propio fabricante a gas (Yuchai YC4G180N-30).

Como se puede apreciar en la (figura 22) existe un comportamiento similar de los parámetros tanto de la potencia como del torque y consumo específico de combustible en el caso del vehículo modificado con el motor a gas se experimenta un ligero incremento de la potencia (17%) y un ligera disminución del consumo específico de combustible en un 2,3 %.

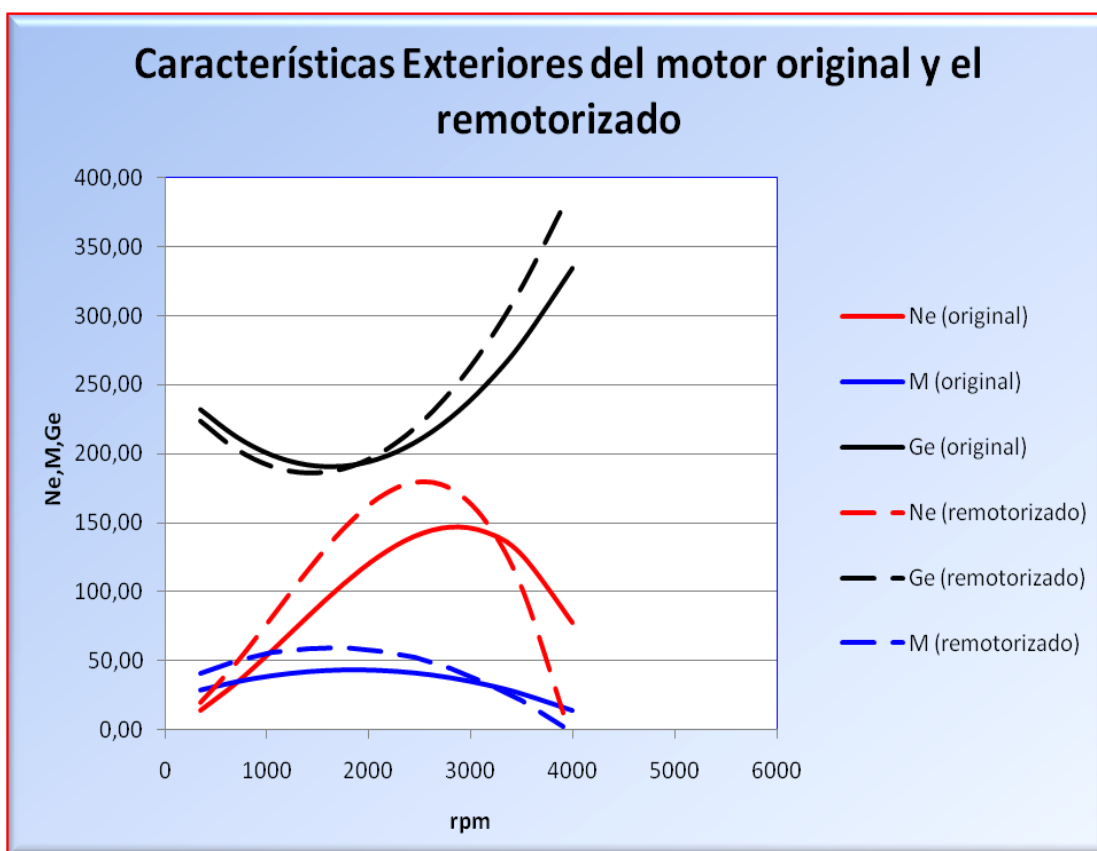


Figura 22. Características generales del motor original y el remotorizado

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de la fuerza de tracción del vehículo en función de la velocidad en Km/h, como se puede apreciar el motor a gas proporciona al vehículo una mayor fuerza de tracción. El incremento de la fuerza de tracción alcanzado con la remotorización es aproximadamente de un 27%, debido fundamentalmente al incremento de la potencia y el torque antes reportado.

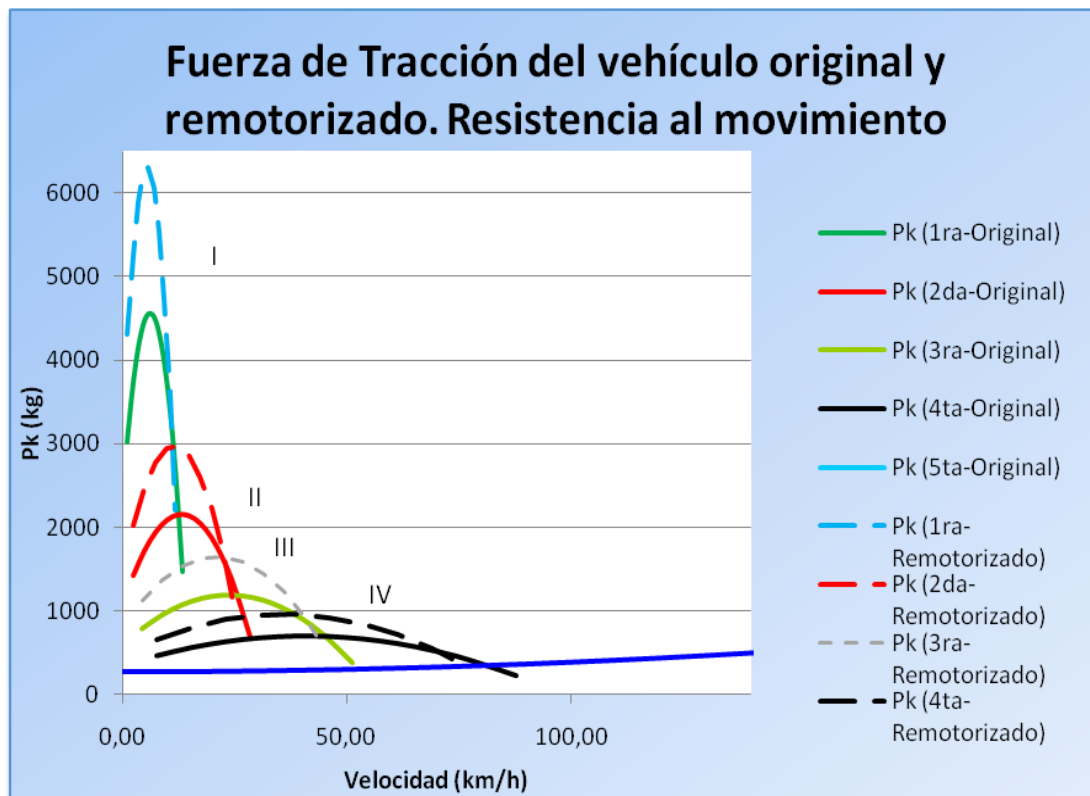


Figura 23. Fuerza de tracción del vehículo original y remotorizado

Este incremento en la fuerza de tracción se considera aceptable pero debe ser evaluado de manera experimental durante la explotación del vehículo, cualquier alteración en su funcionamiento puede ser mejorada introduciendo modificaciones en el sistema de transmisión, específicamente en la relación de transmisión de algunos de sus elementos. Este incremento de Pk puede ser empleado durante la explotación del ómnibus Diana para garantizar el incremento en el peso de trasportación a que tiende este servicio en Cuba al trasportar una mayor cantidad de pasajeros que los concebidos durante el diseño del vehículo.

Conclusiones generales.

1. El potencial anual de biogás de Placetas, correspondiente a los tres escenarios estudiados es de 1 253 061m³, 1 503 673 m³ y 1 754 285 m³, para las cantidades de 25 000, 30 000 y 35 000 cerdos respectivamente.
2. La demanda mensual de combustible del municipio de Santa Clara resulto ser de 96 743 litros, mientras que la de Placetas es de 9 904 litros de diesel y 3 916 litros de gasolina. Estas cantidades se comportan estables durante el año.
3. El potencial de biogás de Placetas es suficiente para cubrir la demanda energética del transporte público de Placetas, quedando un excedente que permite cubrir además la demanda energética del transporte de Santa Clara en 51,67 %, 64,92 % y 77,9 % para los tres escenarios estudiados ,correspondientes a 25 000, 30 000 y 35 000 cerdos respectivamente.
4. La remotorización del ómnibus Diana resulta viable ya que solo se experimenta un incremento de la potencia efectiva de 17 %, y una ligera disminución del consumo específico de combustible de 2,3 %. En el caso de los parámetros dinámicos del vehículo, la fuerza de tracción es superior (27%) en el caso del motor a gas, lo cual mejoraría las cualidades tractivas del vehículo sin afectaciones en el régimen de velocidad del mismo.

Recomendaciones:

1. Mostrar los resultados del trabajo a los especialistas de Transporte Provincial, Villa Clara, de manera que permita evaluar la propuesta y decidir sobre su aplicación, una vez que exista disponibilidad del biometano según las proyecciones de Placetas.
2. Realizar una evaluación económica de la propuesta, la cual no fue posible por no disponer de la información necesaria, que permita conocer en términos económicos la viabilidad de este proyecto e incluir en el estudio una valoración ambiental.
3. Desarrollar un prototipo del ómnibus Diana con el motor propuesto y evaluarlo en ensayos de larga duración durante el servicio de trasportación, para definir las cuestiones de explotación a considerar con este nuevo combustible y evaluar sus cualidades dinámicas durante el movimiento con carga en condiciones reales.

Bibliografía.

- ✓ Anayancy Crespo Artigas, trabajo de diploma: Modelos fenomenológicos que describen el proceso de purificación de biogás empleando membranas vítreas y de zeolita natural”, facultad de ingeniería química, ISPJAE, 2015.
- ✓ Ávila G, M. Biogás de Residuos Agropecuarios en la Región de los Ríos, Política Regional de Desarrollo Silvoagropecuario, 2018.
- ✓ B.P (2011) BP Statistical Review of World Energy June 2011. IN 2011, S. R. O. W. E. F. R. (Ed.).
- ✓ Burgos Aitor Diaz De Basurto. Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Biodigestor Anaerobio con Residuos Orgánicos Generados en el Mercado de Tliquipaya, Bolivia, 2013.
- ✓ Cesar Alberto García, Trabajo de diploma: Evaluación del empleo de biogás como combustible en el motor Zil-130, facultad de Ingeniería mecánica e industrial, UCLV, 2012.
- ✓ Chad Leatherwood, Tecnologías para aprovechamiento de biogás, www.globalmethane.org/documents/events_land_20090326_landfill-26mar09_landfill_gas_utilization_chad_leatherwood.pdf, 2009.
- ✓ Combustible y vehículos alternativos, Manual, octubre de 2005.
- ✓ Cuesta Santianes, M.J.y.c. Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento. Madrid, España, 2006 76. E-28001.
- ✓ Fonseca Gonzales, N, E. Estado del arte del uso de gas de gasificación termoquímica de biomasa (GG) En motores de combustión interna alternativos.2003.
- ✓ González, José Ramírez, Comunicación personal con el director de la Unidad Empresarial de Base Porcina del municipio Placetas, 2018.
- ✓ García Sánchez, Francisco José. Producción de biometano a partir de biogás de vertedero. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.Sevilla.2016.
- ✓ Guardado, J.A. “Tecnología del biogás”, 2006.
- ✓ Guardado, J.A. “Tecnología del biogás”. La Habana, Cuba, 2011.

- ✓ GmbH,S.A.(s.f.).Schwelm-Biogas-Plants.
http://www.schwelmat.de/fileadmin/user_upload/Bilder/303_Referenzen_Broschueren/SAT-BGAA_GB_020414.pdf
- ✓ HERNÁNDEZ, J. S. Year. El Proyecto BIOENERGIA, una contribución a la mitigación y adaptación al cambio climático. In: ESTACIÓN EXPERIMENTAL INDIO HATUEY, U. D. M., ed. XV Seminario Nacional de Energía en apoyo a la toma de decisiones, 2017.
- ✓ Lira Cacho J, G. Regulación automática del sistema de alimentación de biogás de un motor de combustión interna.(2011), glira@uni.edu.pe
- ✓ López Días, Iosvani. Dr.C.Evaluación de Alternativas de Aprovechamiento Energético del Biogás en el Municipio de Placetas.UCLV. (CEETA), 2016.
- ✓ Hernández López, Javier. Título del proyecto: Diseño de un sistema para el aprovechamiento energético de biogás a partir de residuos generados por el ganado vacuno en la vaquería 101 perteneciente a la empresa pecuaria “Camilo Cienfuegos” (Pinar del Rio, Cuba) 2014.
- ✓ Maciel, C. Á. Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. Economía Informa. (2009)
- ✓ Martínez, E. y Díaz de Mera Y. Contaminación atmosférica. Colección Ciencia y Técnica 45, Universidad de Castilla-La Mancha, (2004) ISBN 84-8427-324-5, pp.13-30, 385-402.
- ✓ Pedraza Hernández, Lisbet, Actualización del Diagnóstico Estratégico de la Situación Habitacional del municipio de Placetas, Facultad de Construcciones, Departamento de Arquitectura, UCLV.2010.
- ✓ Petersson, A., & Wellinger, A. Biogas Upgrading Technologies - developments and innovations (2009).
- ✓ Persson, M. Evaluation of upgrading techniques for biogas. (2003).
- ✓ Pérez Rosales Mario Fernando. Trabajo de Graduación: Producción de energía eléctrica a partir de biogás procedente de vertederos de residuos sólidos Urbanos. Guatemala, febrero de 2006.
- ✓ Preston Thomas R. Manual Informativo.2005.
- ✓ Rodríguez, S., Alternativa de Desulfuración de Gas Acompañante del Petróleo Empleando un Residual Líquido. Facultad de Ingeniería

Química, Departamento de Ingeniería Química Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría": La Habana, Cuba. 2014.

- ✓ SUÁREZ, J., MARTÍN, G., SOTOLONGO, J., RODRÍGUEZ, E., SAVRAN, V., CEPERO, L., FUNES-MONZOTE, F., RIVERO, J., BLANCO, D. & MACHADO, R. 2011. Experiencias del proyecto BIOMAS-CUBA. Alternativas energéticas a partir de la biomasa en el medio rural cubano. Pastos y Forrajes, 34, 473-496
- ✓ TURRINI, E. (2006) El camino del Sol. IN LARROSA, A. M. & RODRÍGUEZ, L. T. (Eds.), Cubasolar.
- ✓ Varnero Moreno, M, T. Manual de biogás. Santiago de Chile, 2011
- ✓ Víctor Iriarte Docampo, Trabajo de diploma: "Desulfuración de biogás empleando membranas vítreas y de zeolita natural", Facultad de ingeniería química. ISPJAE.2015.