



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN DE DOS ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DEL
BIOGÁS GENERADO EN UN SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE
RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS URBANOS.**

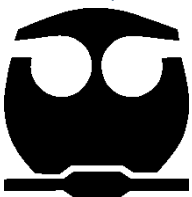
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

ALFONSINA GARCÍA RAMÍREZ



MÉXICO, D.F.

2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: José Antonio Ortiz Ramírez
VOCAL: Alfonso Durán Moreno
SECRETARIO: José Agustín García Reynoso
1er. SUPLENTE: Gema Luz Andraca Ayala
2° SUPLENTE: Sergio Adrián García González

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: 3er. Piso, ala sur, Torre de Ingeniería, Ciudad Universitaria.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Alfonso Durán Moreno

SUSTENTANTE:

Alfonsina García Ramírez



Agradecimientos

Le Agradezco al Dr. Alfonso Durán Moreno por permitirme participar en el proyecto, por brindarme consejos y tiempo para escucharme, por su paciencia, Gracias por todo.

A los ingenieros de la Torre de Ingeniería especialmente al Ingeniero Arturo Xochicale, Héctor Patricio, Germán Basurto, Ulises Ocampo, Roberto, Julieta Chirino, Erika Ruíz, Paulina Ponce, Gustavo Peralta, Jesús Sánchez, Raúl Feres, José Medina . A Shamira, Araceli Guerra, Martha Roa, Sandra Millán, Diana Casas, David por compartir buenos momentos, por su ayuda, sus consejos y todo lo demás, Gracias.

Muchas gracias a mis sinodales José Agustín y José Ortiz por sus observaciones y consejos.

A CONACyT por el financiamiento otorgado a través del proyecto 174710.

A la UNAM y Facultad de Química donde aprendí muchísimas cosas, conocí a mucha gente que me enseñó cosas muy interesantes, no hay manera de agradecer fue mi hogar durante mucho tiempo.

Dedicatoria

Por brindarme la vida, quiero agradecer infinitamente a mi Papá y Mamá, que han sido amigos, que han estado conmigo en mis mejores y peores momentos, porque me han enseñado que la transformación esta en uno mismo, por la fuerza y la voluntad que han tenido para sacarnos a delante a mis hermanos y a mí, simplemente no hay palabras para agradecer.

A mis hermanos Iveth y Fabricio Jr. que siempre han estado ahí siempre han sido un soporte para mí, una guía.

A David Gustavo García, un destello de fuerza y amor, te agradezco la dedicación, paciencia, el que me empujes siempre adelante con tu positivismo frenético.



**Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.**

A Agustina Bermejo† que me enseñó la perseverancia y cumplir con los objetivos que uno se proponga, no importa que se atravesase uno siempre puede. A mi Tío Alfredo que también fue como un padre que siempre me indujo al lado de la ciencia y mi tío Miguel que me enseñó que la vida solo hay que disfrutarla. A toda la familia (toda la familia, es demasiada) por todo su apoyo comprensión y cariño.

Por los cuidados, los buenos y malos consejos y el amor que día a día transmiten, me alegra haber tenido la oportunidad de pertenecer a una familia tan maravillosa, los quiero.

A todos mis amigos que han convivido conmigo durante muchísimos años, Marisela, Mariana, Úrsula y que he conocido durante la carrera y en otros lugares Gracias por todo.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	JUSTIFICACIÓN.....	3
1.2	OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3	OBJETIVOS PARTICULARES.....	4
1.4	ALCANCE.....	4
1.5	METODOLOGÍA.....	4
2	MARCO TEÓRICO	6
2.1	RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	6
2.2	BIOGÁS.....	8
2.2.1	<i>Producción del biogás.</i>	8
2.2.2	<i>Composición del biogás.</i>	12
2.2.3	<i>Usos del biogás.</i>	13
2.3	GAS NATURAL.....	15
2.3.1	<i>Composición del gas natural.</i>	15
2.3.2	<i>Situación del gas natural en México.</i>	16
2.4	PROCESOS PARA LA LIMPIEZA Y EL MEJORAMIENTO DEL BIOGÁS.....	18
2.4.1	<i>Limpieza del biogás.</i>	18
2.4.2	<i>Mejoramiento del biogás.</i>	26
2.5	GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS.....	40
2.5.1	<i>Motores de combustión interna y generadores eléctricos.</i>	41
2.6	EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS Y TOMA DE DECISIÓN.....	47
2.6.1	<i>Herramientas de toma de decisión.</i>	48
2.7	ESTIMACIÓN DE COSTOS.....	50
3	EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE LIMPIEZA Y MEJORAMIENTO DEL BIOGÁS	55
3.1	EVALUACIÓN AMBIENTAL, TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LAS TECNOLOGÍAS DE MEJORAMIENTO DEL BIOGÁS.....	56
3.1.1	<i>Definición de los criterios de evaluación.</i>	56
3.1.2	<i>Definición de la escala de evaluación.</i>	60
3.1.3	<i>Resultados.</i>	61
3.2	EVALUACIÓN AMBIENTAL, TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LAS TECNOLOGÍAS DE LIMPIEZA DEL BIOGÁS.....	64



**Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.**

3.2.1	<i>Definición de los criterios de evaluación.</i>	64
3.2.2	<i>Definición de la escala de evaluación</i>	67
3.2.3	<i>Resultados.</i>	67
4	CASO DE ESTUDIO.	70
5	SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS	70
5.1	CASO 1. SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS PARA SU INYECCIÓN A LA RED DE GAS NATURAL.	71
5.1.1	<i>Estimación de Costos</i>	74
5.2	CASO 2. SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA	75
5.3	OPCIÓN 1: GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA REMOCIÓN DE H ₂ O Y H ₂ S	75
5.3.1	<i>Estimación de Costos</i>	77
5.4	OPCIÓN 2: GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA REMOCIÓN DE H ₂ O, H ₂ S Y CO ₂ .	78
5.4.1	<i>Estimación de Costos</i>	79
6	RESULTADOS.	80
7	CONCLUSIONES	82
8	REFERENCIAS	83
	ANEXOS.	88
8.1	MAPA DE GASODUCTO EN EL ESTADO DE MÉXICO.	88
8.2	BALANCE DE MATERIA PARA EL BIOGÁS.	89
8.3	CÁLCULO DEL CONTENIDO ENERGÉTICO EN EL BIOGÁS	90



**Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.**

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS, GENERADO EN UN RELLENO SANITARIO Y EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA (PERSSON MARGAREAT, 2006).	12
TABLA 2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL BIOGÁS (DEUBLEIN, 2008).	13
TABLA 3 ESPECIFICACIONES DEL GAS NATURAL. (NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SECRE-2010). 15	
TABLA 4 ESTACIONES Y CAPACIDAD EN EL GASODUCTO DEL ESTADO DE MÉXICO (TEJAS GAS DE TOLUCA).	17
TABLA 5 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE LA COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS PARA EL MOTOR Y LA COGENERACIÓN (LLANEZA H., 2010).	18
TABLA 6 CARACTERÍSTICAS, VENTAJAS Y DESVENTAJAS PARA LA REMOCIÓN DE AGUA (DROUILLON Y OTROS, 2008).....	19
TABLA 7 CONCENTRACIÓN ESTÁNDAR H ₂ S PARA DIVERSAS APLICACIONES (HUYNH Q.).....	20
TABLA 8 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MÉTODOS DE REMOCIÓN DE SULFURO DE HIDRÓGENO. (ABATZOGLOU, Y OTROS, 2009).....	24
TABLA 9 DESCRIPCIÓN DE LAS CORRIENTES.....	29
TABLA 10 FLUJO DE AGUA NECESARIO PARA LA PURIFICACIÓN DE 100 NM ³ /H DE BIOGÁS BRUTO BAUER FREDRIC, ET AL., 2013.	34
TABLA 11 CARACTERÍSTICAS DE LOS MÓDULOS DE MEMBRANA (BAUR FREDRIC, 2012).....	39
TABLA 12 COMPARACIÓN DE EQUIPOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS (KAPARAJU Y OTROS, 2013).	40
TABLA 13 DIFERENCIAS ENTRE EL MOTOR DIÉSEL Y OTTO (GARCÍA, 2010).....	42
TABLA 14 TABLA COMPARATIVA DE MOTOR OTTO Y DIÉSEL.....	44
TABLA 15 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE ACUERDO A LAS CAPACIDADES DE LOS MOTO-GENERADORES (OCHOA, Y OTROS, 2007).	46
TABLA 16 DIVERSAS CLASIFICACIONES DE ESTIMADOS DE COSTOS (APUNTES DE INGENIERÍA DE PROYECTOS).	52
TABLA 17 MATRIZ DE ESTIMACIÓN DE COSTOS (PRESENTACIÓN ESTIMADO DE COSTOS, EQUIPO DE TRABAJO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y AACE INTERNATIONAL (ASOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF COST ENGINEERING INTERNATIONAL)).	53
TABLA 18 ELEMENTOS DE COSTOS DEL MÉTODO GUTHRIE.....	54
TABLA 19 EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS TÉCNICOS.	58
TABLA 20 EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS AMBIENTALES.....	59
TABLA 21 EVALUACIÓN DE CRITERIOS ECONÓMICOS.....	60
TABLA 22 ESCALA DE EVALUACIÓN, PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS Y SUB-CRITERIOS A EVALUAR.	60



**Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.**

TABLA 23 RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE CRITERIOS.....	61
TABLA 24 ESCALA CUALITATIVA PARA EVALUAR LA COMPLEJIDAD OPERATIVA.....	65
TABLA 25 MATRIZ MULTICRITERIO PARA LA EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE REMOCIÓN DE SULFURO DE HIDRÓGENO.	66
TABLA 26 LISTA DE EQUIPO PARA EL PROCESO DE MEJORAMIENTO DE BIOGÁS.	73
TABLA 27 INVERSIÓN TOTAL DEL SISTEMA DE MEJORAMIENTO DEL BIOGÁS.....	74
TABLA 28 INVERSIÓN TOTAL DEL SISTEMA DE MEJORAMIENTO DEL BIOGÁS.....	77
TABLA 29 INVERSIÓN TOTAL DEL SISTEMA DE MEJORAMIENTO DEL BIOGÁS.....	79
TABLA 30 CUADRO DE RESULTADOS.	80
TABLA 31 COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS ESTIMADA PARA EL CASO DE ESTUDIO.	89
TABLA 32 TABLA DE ENTALPÍAS DE FORMACIÓN (ADMSON, 1979).....	90



**Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.**

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 DIAGRAMA DE FLUJO DE LAS ETAPAS PRINCIPALES DEL TRABAJO DE TESIS.....	5
FIGURA 2 GENERACIÓN DE RSU EN LAS ENTIDADES FEDERATIVAS (SEMARNAT, 2012).....	6
FIGURA 3 COMPOSICIÓN DE RSU EN MÉXICO (SEMARNAT, 2012).....	7
FIGURA 4 ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA (MURPHY Y OTROS, 2013).....	9
FIGURA 5 TRATAMIENTO DE BIOGÁS Y SUS USOS (AMERICAN BIOGAS COUNCIL).....	14
FIGURA 6 PRECIO DEL GAS NATURAL EN LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS (SECRETARÍA DE ECONÓMICA).....	17
FIGURA 7 BIOFILTRO (AMERICAN BIOGAS COUNCIL, 2014).....	23
FIGURA 8 RECIPIENTES DE CARBÓN ACTIVADO PARA LA REMOCIÓN DE H ₂ S (AMERICAN BIOGAS COUNCIL).	24
FIGURA 9 PROCESO DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS, EL CO ₂ , H ₂ S, Y EL VAPOR DE AGUA DEBEN SER ELIMINADOS ANTES DE QUE SE INYECTE A LA RED DE GAS NATURAL (SCHOLZ ET AL., 2012).....	26
FIGURA 10 PLANTAS INSTALADAS PARA EL MEJORAMIENTO DE BIOGÁS, EN DONDE SE MUESTRA EL NÚMERO DE PLANTAS DE CADA TECNOLOGÍA EXISTENTE EN EL MERCADO MUNDIAL (PETERSON, 2014).....	27
FIGURA 11 NÚMERO DE PLANTAS DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS EN CADA PAÍS (PERSON, 2014).....	28
FIGURA 12 PROCESO DE ABSORCIÓN QUÍMICA CON AMINAS (BAUER FREDRIC, ET AL., 2013).....	29
FIGURA 13 DIAGRAMA DE PROCESO DE LA ADSORCIÓN POR CAMBIO DE PRESIÓN, (SCHOLZ MARCO, ET AL, 2012; BAUER FREDRIC, ET AL, 2013).....	31
FIGURA 14 ESQUEMA DEL PROCESO DE ABSORCIÓN CON AGUA (BAUR FREDRIC, 2012).....	32
FIGURA 15 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO SIMPLIFICADO DE LA ABSORCIÓN CON POLIETILENGLICOL.	34
FIGURA 16 DISEÑO TÍPICO DEL MEJORAMIENTO DE BIOGÁS CON MEMBRANAS (BAUR FREDRIC, 2012).....	35
FIGURA 17 SEPARACIÓN EN LA MEMBRANA (FOLLETO DMT CARBOREX RMS).....	36
FIGURA 18 ARREGLO 1 DE LAS ETAPAS DE SEPARACIÓN POR MEMBRANAS.....	37
FIGURA 19 ARREGLO DOS, CON DOS ETAPAS DE SEPARACIÓN POR MEMBRANAS.....	37
FIGURA 20 DISEÑO TRES, EN EL CUAL HAY TRES ETAPAS DE MEMBRANAS PARA UNA ÓPTIMA SEPARACIÓN DEL METANO.....	38
FIGURA 21 MEMBRANAS DE FIBRAS HUECAS (HOLLOW FIBER) (GREENCARCONGRESS).....	38
FIGURA 22 ESQUEMA GENERAL DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA FUENTE WWW.CNEQ.UNAM.MX..	42
FIGURA 23 NOMENCLATURA PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS.....	44
FIGURA 24 FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO BASADO EN EL PRINCIPIO DE FARADAY DE "INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA" (ENRÍQUEZ, 2004).....	45
FIGURA 25 MOTO-GENERADOR DE LA MARCA AQUALIMPIA.....	46
FIGURA 26 CLASIFICACIÓN DE COSTOS.....	51



**Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.**

FIGURA 27 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA EL MEJORAMIENTO DE BIOGÁS Y PARA LOS PROCESOS DE REMOCIÓN DE H ₂ S (PARIS, 2014).	55
FIGURA 28 CLASIFICACIÓN GRÁFICA DE LAS TECNOLOGÍAS DE MEJORAMIENTO DEL BIOGÁS. ELABORADO MEDIANTE EL SOFTWARE VISUAL PROMETHEE I.	62
FIGURA 29 CLASIFICACIÓN GRÁFICA DE LAS TECNOLOGÍAS DE MEJORAMIENTO DEL BIOGÁS ELABORADO MEDIANTE EL SOFTWARE VISUAL PROMETHEE II. EVALUACIÓN AMBIENTAL, ECONÓMICA Y TÉCNICA PARA EL PROCESO DE REMOCIÓN DE H ₂ S	63
FIGURA 30 CLASIFICACIÓN GRÁFICA DE LAS TECNOLOGÍAS DE REMOCIÓN DE H ₂ S, USANDO LA APLICACIÓN PROMETHEE I.	68
FIGURA 31 CLASIFICACIÓN GRÁFICA DE LAS TECNOLOGÍAS DE REMOCIÓN DE H ₂ S, USANDO PROMETHEE II.	69
FIGURA 32 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE MEJORAMIENTO DEL BIOGÁS.....	72
FIGURA 33 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO PARA LA LIMPIEZA DEL BIOGÁS PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA (ELABORACIÓN PROPIA).	76
FIGURA 34 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS. 78	



**Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.**

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

RSOM	Residuos Sólidos Orgánicos Municipales
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
DA	Digestión Anaerobia
FORSU	Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos
PMS	Punto muerto superior
PMI	Punto muerto inferior
CD	Costo directo
CI	Costo indirecto
PSA	Adsorción por cambio de presión
WSC	Absorción con agua.



1 INTRODUCCIÓN

México es un país con una población que crece exponencialmente, lo cual implica un incremento anual del consumo de productos y del desecho de los mismos. Diariamente se generan alrededor de 112.5 mil toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) en el país (SEMARNAT, 2012). Estos residuos requieren ser recolectados y depositados en rellenos sanitarios o en sitios controlados, lo cual representa un gasto para el estado el cual es proporcionado por cada uno de los contribuyentes. Las entidades federativas que generan mayores residuos son el Estado de México con 18 mil toneladas diarias y el Distrito Federal con 13.5 mil toneladas de RSU. Los residuos de estas entidades están formados principalmente por sólidos orgánicos. Los residuos orgánicos se descomponen por medio de un proceso biológico conocido como digestión anaerobia el cual genera biogás que es una mezcla de gas compuesta principalmente por metano, dióxido de carbono, esta mezcla de gases como también lixiviados que al estar expuestos provocan daños irreversibles al medio ambiente.

El biogás puede ser aprovechado como combustible tanto para la generación de energía eléctrica como gas natural, al usarse como fuente de energía se pueden obtener beneficios ambientales y económicos. Este trabajo se enfoca en evaluar y comparar dos alternativas de aprovechamiento de biogás. La primera alternativa es procesar el biogás hasta obtener un gas que cumpla con las especificaciones del gas natural e inyectarlo a la red de gas natural el segundo caso o alternativa es aprovechar el biogás para la generación de energía eléctrica.

Para llegar a tomar una decisión de que caso sería el mejor se realizaron diversas actividades entre ellas el contacto con industrias que han instalado plantas de aprovechamiento de biogás, el análisis de los procesos y la estimación de costos determinando así la mejor alternativa.



**Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.**

Los proyectos ambientales que proponen el uso de residuos de cualquier índole para convertirlos en recursos son muy importantes ya que marcan una nueva forma del sistema económico, social y ambiental que vivimos ya que no sólo se basan en aprovechar una sola vez un producto si no aprovecharlo a su máxima capacidad convirtiéndolos nuevamente en energía.

En el capítulo dos se hablara sobre la problemática de los RSU así como su reutilización para generar biogás y las características del mismo. Se mencionarán los procesos necesarios para usar el biogás como combustible. En el capítulo posterior se desarrolla una evaluación de tecnologías de los dos procesos principales para limpiar y mejorar el biogás para su uso. En el capítulo cuatro se explica el caso de estudio y la razón de la capacidad de generación del biogás. El subsecuente capítulo se describen las dos alternativas de aprovechar el biogás tanto para genera energía eléctrica como para su incorporación a la red de gas natural.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

1.1 JUSTIFICACIÓN.

Un problema en México, principalmente en los estados con mayor generación de RSOM, es la disposición de los mismos. En países europeos como Alemania, Suiza, España e Inglaterra han motivado a darle un uso a los RSOM para convertirlos en energía. En el Estado de México, así como otras entidades Federativas, están comprometidas con mitigar la emisión de gases efecto invernadero y la reducción de los residuos urbanos.

Es por ello la importancia de desarrollar no sólo la investigación del empleo de los RSOM, sino también llevarlo a la práctica. El paso para llegar a esta meta es mediante la generación de la ingeniería para evaluarla y finalmente definir si es provechoso hacer o no el proyecto.

Una parte importante de un sistema de digestión anaerobia es el aprovechamiento del biogás. Por lo que se requiere evaluar que alternativa puede resultar más factible que sea rentable y que disminuya la contaminación ambiental.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Evaluar comparativamente el aprovechamiento del biogás generado a partir de residuos sólidos orgánicos urbanos en un digestor anaerobio, ya sea mediante un proceso de mejoramiento para su uso como gas natural o para su uso directo como combustible para la producción de energía eléctrica.



1.3 OBJETIVOS PARTICULARES

Seleccionar un proceso de mejoramiento del biogás para que cumpla las especificaciones para su incorporación a redes de transporte de gas natural, elaborando un diseño conceptual de las etapas principales del proceso y realizando un estimado de costos Nivel III.

Seleccionar un proceso de producción de energía eléctrica a partir de biogás, elaborando un diseño conceptual de las etapas principales del proceso y realizando un estimado de costos Nivel III.

Determinar qué alternativa de aprovechamiento de biogás representa las mejores ventajas técnicas, económicas y ambientales.

1.4 ALCANCE

Decidir cuál es la alternativa que ofrece mayores beneficios para el uso del biogás, mediante la evaluación de las tecnologías de limpieza y mejoramiento del biogás comercialmente más comunes a través de la descripción de cada proceso y del análisis de los costos asociados.

1.5 METODOLOGÍA

La metodología del trabajo está enfocada en comparar dos formas de aprovechar el biogás con la finalidad de obtener una propuesta que indique un beneficio mayor para este. Primero se realizó una investigación sobre los usos y formas de aprovechar el biogás, después se consiguió información de proveedores se seleccionó y ordeno para definir la manera de evaluar los métodos y las tecnologías de darle uso al biogás. Posteriormente se realizó la descripción de los procesos para el caso uno y dos determinando los costos de inversión, operación y la rentabilidad. Finalmente se seleccionó la forma de aprovechar el biogás obteniendo mayores beneficios. Las etapas de la metodología se pueden ver en la Figura 1.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

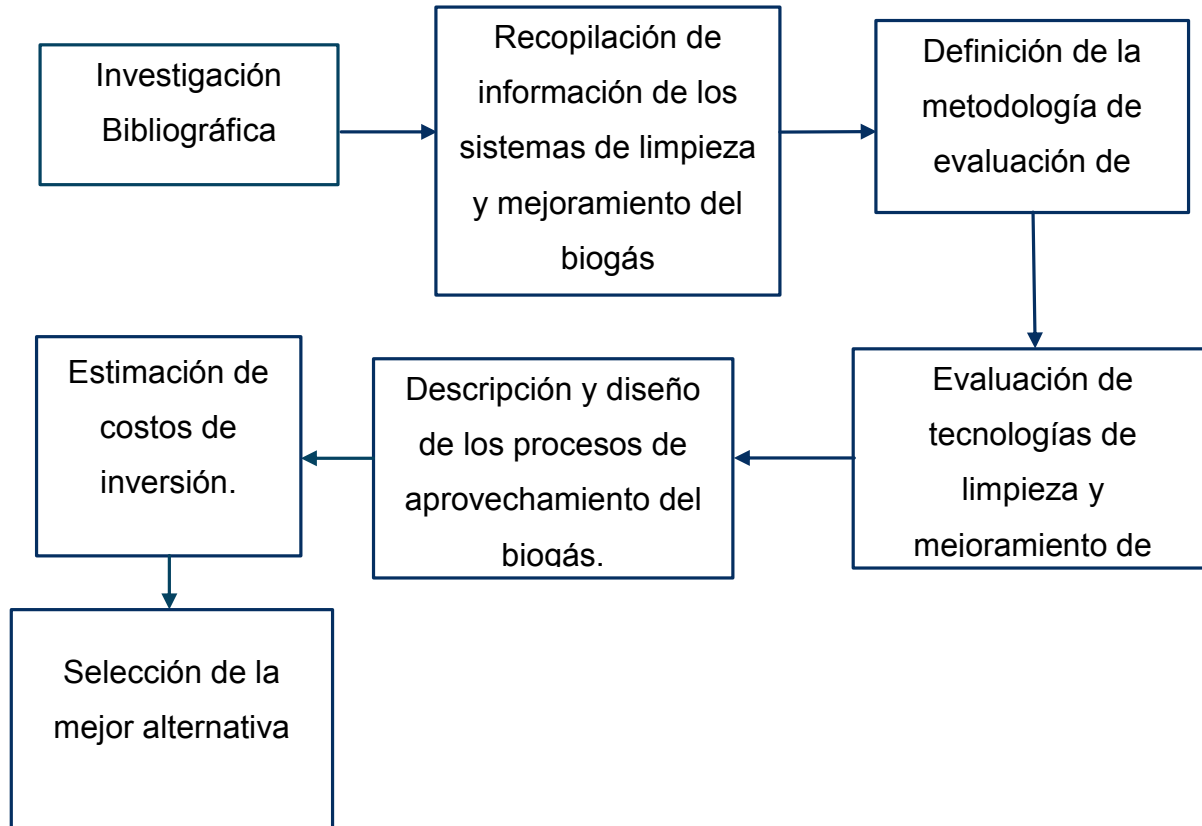


Figura 1 Diagrama de flujo de las etapas principales del trabajo de tesis.



2 MARCO TEÓRICO

2.1 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

Los residuos sólidos urbanos (RSU) se definen en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) como aquellos generados en las casa habitación debido a la eliminación de materiales que se utilizan en las actividades domésticas; son también los que provienen de establecimientos, vía pública y que tienen características similares a los domiciliarios siempre que no sean considerados como residuos de otra índole (SEMARNAT, 2014).

El aumento de la población implica un crecimiento en el consumo y en la generación de residuos, tan sólo del año 2003 al 2011 creció un 25% la generación de residuos, el desarrollo industrial y económico conllevan a un cambio en los patrones del consumo y generación de residuos, dentro del país difiere de manera significativa la generación total de RSU. Como se puede observar en la Figura 2 las entidades federativas que generan más RSU son el Estado de México, seguido del Distrito Federal (SEMARNAT, 2012).

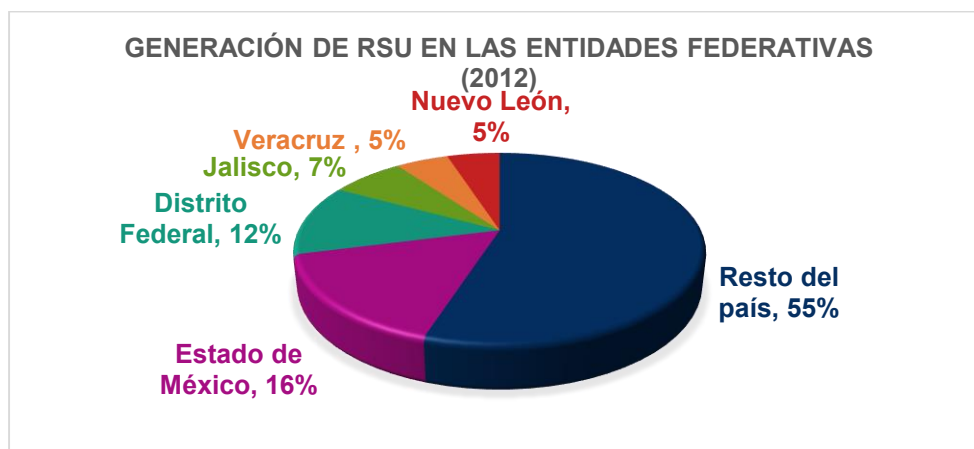


Figura 2 Generación de RSU en las entidades Federativas (SEMARNAT, 2012).



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

En el año 2011 se estimó que el 72% de volumen generado de RSU en el país se dispuso en rellenos sanitarios y sitios controlados, el 23% en sitios no controlados y el restante 5% se recicló (SEMARNAT, 2012).

La composición de RSU en México, se clasifica como la fracción orgánica (FORSU), es decir residuos de comida, jardín, entre otros, productos de papel, aluminio, vidrio, textil y metales (Ver Figura 3). El 52.4% del total de los residuos corresponden a residuos orgánicos y el 47.57% de residuos inorgánicos, de los cuales sólo el 3.92% se recicla, por lo que es importante buscar soluciones para tratar y aprovechar la FORSU (SEMARNAT, 2012).

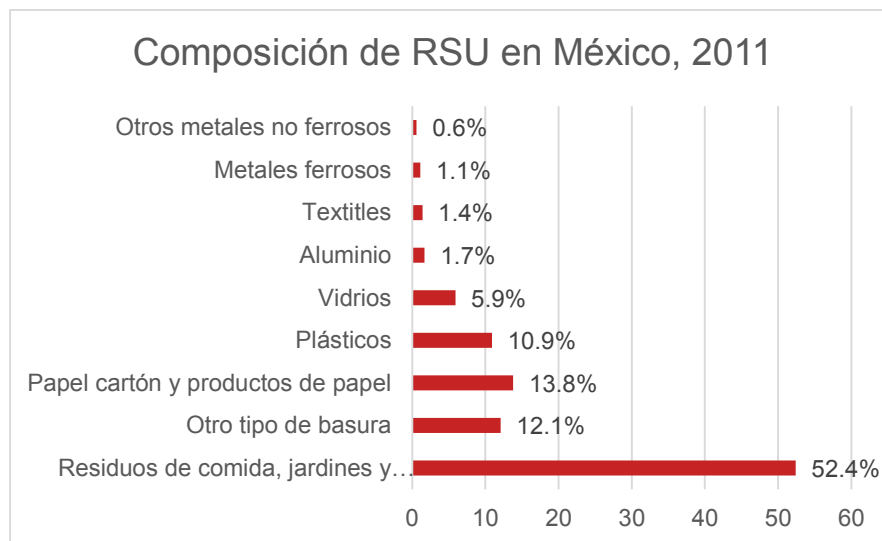


Figura 3 Composición de RSU en México (SEMARNAT, 2012)



2.2 BIOGÁS

El biogás es una mezcla de metano, dióxido de carbono y otros componentes en menor cantidad (véase 2.2.2). Esta mezcla de gases se genera mediante un proceso llamado digestión anaerobia, en el cual la materia orgánica (como los restos de comida, plantas, desechos animales, lodos y la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales) se degrada por medio de bacterias y arqueas en ausencia de oxígeno (Costa Gomez, 2013)

2.2.1 Producción del biogás.

Las primeras observaciones de la generación del biogás se iniciaron desde el siglo XVII, cuando Van Helmont registró por primera vez la generación de un producto gaseoso inflamable a partir de la materia orgánica. En el mismo siglo, Volta encontró que la generación de gas estaba relacionada directamente con la cantidad de materia orgánica que se dejaba en enormes pilas. Durante el siglo XVIII, se reportaron diversos descubrimientos como la formación de metano durante la descomposición de la materia orgánica a través del proceso microbiológico. Conforme transcurrieron los años hasta llegar a 1881 Frenchman, Mouras, aplicaron la digestión anaerobia para tratar aguas residuales. En 1895 Cameron construyó un tanque para darle un mejor tratamiento a la digestión anaerobia de las aguas residuales, además evaluó el gas generado durante la descomposición de los lodos. Durante los siguientes siglos, se desarrolló la tecnología de la digestión anaerobia, en 1970 se empezó a aplicar la digestión anaerobia a sistemas industriales. Finalmente en los años de 1969-1973 un poco después del “Oil Schocks”, se prestó más atención al proceso de digestión anaerobia por el metano que podía generar y se desarrollaron reactores anaeróbicos más eficientes para incrementar la producción de metano (Tasneem A., 2012).

La digestión anaerobia permite la degradación de la materia orgánica en un proceso de cuatro etapas las cuales son (véase Figura 4).



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

Hidrólisis. Los compuestos orgánicos complejos, son degradados por acción de enzimas hidrolíticas en moléculas más pequeñas y solubles (Campos y otros, 2012).

Acidogénesis. Los compuestos solubles obtenidos de la etapa anterior se transforman en ácidos grasos de cadena corta como alcoholes, ácidos orgánicos y compuestos orgánicos de nitrógeno y azufre (Campos y otros, 2012).

Acetogénica. Los compuestos intermedios se transforman en productos como ácido acético, hidrógeno, ácido sulfhídrico y dióxido de carbono (Campos, y otros, 2012).

Metanogénesis. Los productos principales de esta etapa son el metano y el dióxido de carbono.

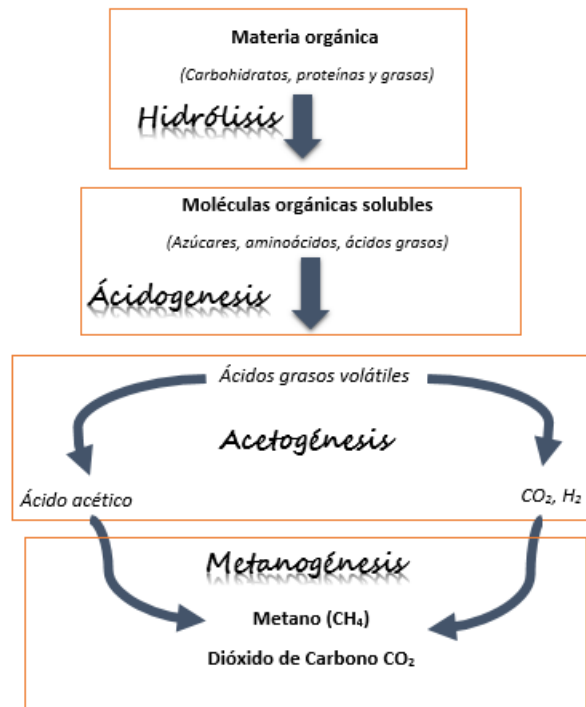


Figura 4 Etapas de la digestión Anaerobia (Murphy y otros, 2013)

Para que las bacterias degraden eficientemente el sustrato (la materia orgánica), se deben mantener condiciones en el proceso, como la ausencia de oxígeno, una temperatura uniforme, pH uniforme y los nutrientes adecuados (Tasneem A., 2012).



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

A continuación se describe las condiciones operacionales que se deben tomar en cuenta durante el proceso de digestión anaerobia para la degradación del sustrato y por ende una mayor generación de biogás.

Proporción C/N. Proporción relativa de carbono y nitrógeno (C/N) presente en el sustrato (la materia orgánica). Si la proporción C/N es muy alta, el nitrógeno se consume rápidamente por la metanogénesis y por lo tanto no podrá reaccionar todo el carbono. Como resultado la producción del biogás decrece. Si la proporción C/N es muy baja, el nitrógeno se libera y se acumula en forma de amonio. Cuando el valor de pH se eleva a 8.5, se inicia un efecto tóxico sobre las bacterias metanogénicas. Para los residuos sólidos municipales, la proporción C/N es de 40 (J.Banks y otros, 2013).

pH. El intervalo de pH (potencial de hidrógeno) para obtener una producción de biogás “óptima”, es de 6 a 7. Durante el periodo inicial de la digestión, se genera gran cantidad de materia orgánica provocando que el pH de la mezcla disminuya y aumente la concentración de amoniaco. Normalmente la disminución del pH se puede controlar con la adición de cal (J.Banks y otros, 2013).

Temperatura. Los intervalos de temperatura adecuados para la operación de los reactores son:

- Termofílico (55 a 60 °C)
- Mesofílico (35 a 40 °C)
- Psicofílico <20 °C

Si la temperatura aumenta a 43 °C en el intervalo mesofílico, se pueda dar lugar a que se inhiba el proceso, esto ocurre también para el intervalo termofílico al incrementar a 63 °C.

La digestión anaerobia a gran escala generalmente usa una temperatura mesofílico, ya que es una temperatura a la cual se puede controlar más el proceso (J.Banks y otros, 2013).



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

Índice de carga. Es un parámetro importante en el control del proceso. Si hay una sobrecarga en el sistema, puede provocar una inadecuada mezcla del residuo con el lodo, lo que causa que incremente significativamente la concentración de los ácidos grasos volátiles, disminuyendo así el pH.

Tiempo de retención. Es la duración en la cual el sustrato y los microorganismos deben permanecer juntos en el digestor para alcanzar la degradación deseada.

Tiempo de retención de sólidos. Tiempo durante el cual los microorganismos activos residen en un digestor.

Toxicidad. Materiales como metales pesados y detergentes inhiben el crecimiento normal de las bacterias en un digestor, así como en pequeñas cantidades de minerales (sodio, potasio, calcio, magnesio, amoníaco y sulfuros) estimulan el crecimiento de las bacterias, pero en concentraciones altas tanto de metales pesados y minerales tienden a tener un efecto tóxico sobre las bacterias.

Mezcla y agitación.

El mezclado es necesario para mantener un fluido homogéneo, por lo tanto un proceso estable, dentro del digestor. Los objetivos del mezclado son: combinar el material entrante con los microorganismos, impedir la formación de espuma y evitar cambios bruscos en la temperatura del digestor.

Patógenos. En los residuos sólidos municipales, se presentan ciertas bacterias patógenas y virus que pueden poner en riesgo de infección a los trabajadores que manipulan los residuos de la digestión anaerobia. Por lo que se recomienda un pre-tratamiento de sanitización de la materia a 70°C por lo menos durante una hora.



2.2.2 Composición del biogás.

El biogás está compuesto principalmente por metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno (Deublein, 2008). Usualmente el biogás también está saturado por vapor de agua y puede contener impurezas como los siloxanos. En la Tabla 1 y en la Tabla 2, se indica la composición del biogás. (Persson Margareat, 2006)

Tabla 1 Composición del biogás, generado en un relleno sanitario y en la digestión anaerobia (Persson Margareat, 2006).

Parámetro	Fórmula	Unidad	Relleno Sanitario	Digestión Anaerobia
Metano	CH ₄	% Vol	35-65	53-70
Hidrógeno	H ₂	% Vol	0-3	0
Dióxido de Carbono	CO ₂	% Vol	15-50	30-47
Nitrógeno	N ₂	% Vol	5-40	-
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	ppm	0-100	0-10000
Oxígeno	O ₂	% Vol	0-5	-
Amoniaco	NH ₃	ppm	5	<100
Número de Metano			>130	>135
Densidad		kg/nm ³	1.3	1.2
Wobbe index ¹		mJ/nm ³	18	27

¹ Wobbe index (en español índice Wobbe) es un indicador que permite determinar si el gas natural tiene calidad intercambiable con otro gas de reemplazo. Para esto el índice Wobbe debe ser igual para los dos gases.



Tabla 2 Características Generales del biogás (Deublein, 2008).

Composición	55-70% metano, 30-45% Dióxido de carbono y trazas de otros gases.
Contenido energético	6-6.5 kWh/m ³
Combustible equivalente	0.60-0.651 aceite/m ³ biogás
Límite de explosión	6-12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650-750 °C (Con la composición de metano contenido en el biogás)
Presión Crítica	75-89 bar
Temperatura Crítica	-82.5 °C
Olor	Huevo podrido (El olor de biogás desulfurado es apenas notable)
Masa Molar	16.043 kg kmol ⁻¹

2.2.3 Usos del biogás.

El aprovechamiento del biogás ha tenido un mayor crecimiento a partir del nuevo siglo, especialmente en países Europeos. En América los países que le han dado un mayor aprovechamiento al biogás han sido principalmente Estados Unidos de América y Brasil. El biogás principalmente se usa de las siguientes formas:

- Producción de calor y vapor
- Generación de electricidad y co-generación
- Combustible para automóviles
- Inyección a la red de gas natural

Para darle estos usos al biogás debe ser sometido a un tratamiento para remover contaminantes que pueden dañar las máquinas, a la salud humana y también al medio ambiente. Estos contaminantes son el dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, agua y siloxanos que se generan en la descomposición de la FORSU.

El tratamiento de biogás puede clasificarse en dos niveles, el primero es la limpieza del biogás y otra que nombraremos mejoramiento del biogás (biogas up-grading).

Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

La limpieza del biogás se enfoca principalmente en remover agua y sulfuro de hidrógeno. El mejoramiento del biogás remueve agua, sulfuro de hidrógeno, CO₂. Con la remoción del dióxido de carbono aumenta el volumen de energía contenido en el gas (Pettersson, 2013). Si después del tratamiento el gas no alcanza los requerimientos de las normas para su inyección a la red de gas natural se requerirá la adición de propano para aumentar su poder calorífico y cumplir con la norma.

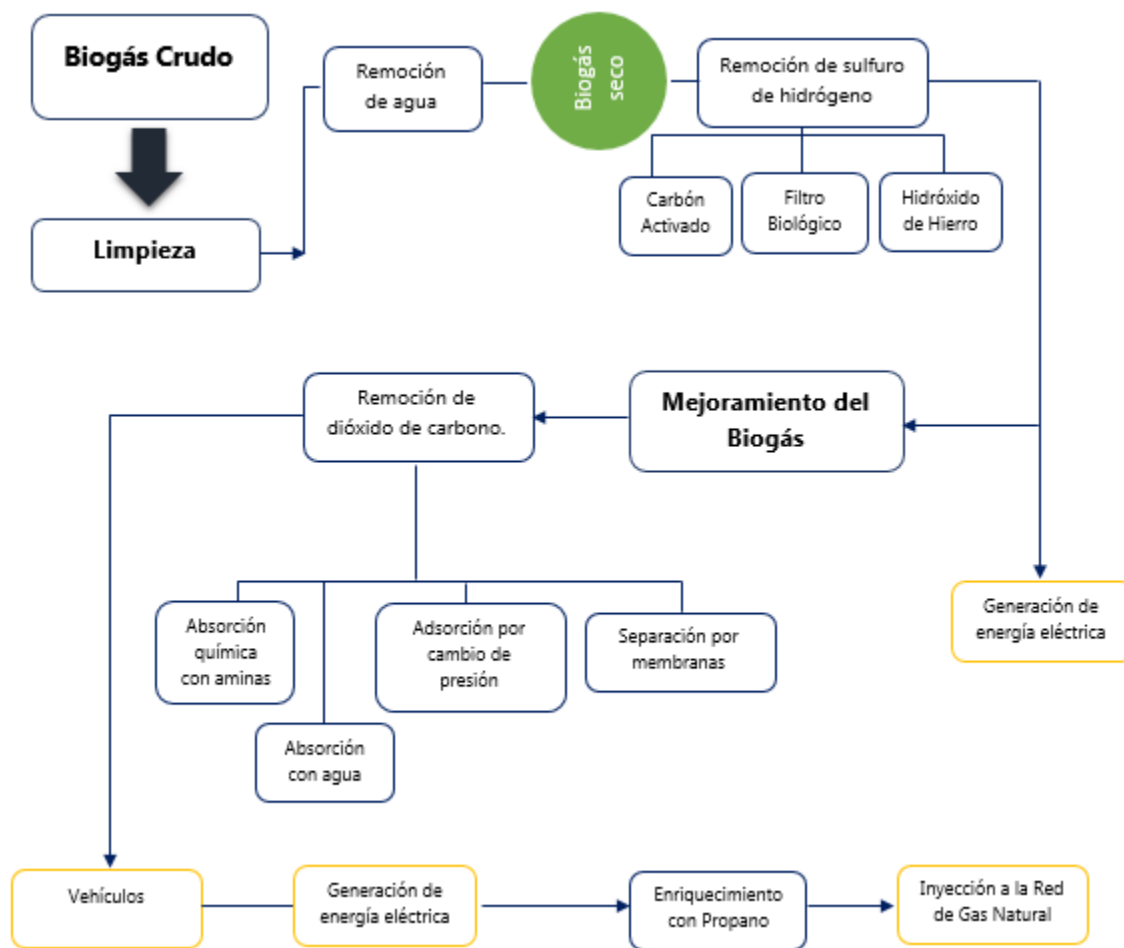


Figura 5 Tratamiento de biogás y sus usos (American Biogas Council)



2.3 GAS NATURAL

En este capítulo se hará una semblanza sobre la composición del gas natural, su importancia y la red de gas natural en el Estado de México.

2.3.1 Composición del gas natural.

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos, principalmente de metano (aproximadamente un 95%), etano, propano, butano, pentanos en adelante, e impurezas como nitrógeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y agua (PEMEX, 2012).

En México de acuerdo con la (NOM-001-SECRE 2010), el gas natural que se quiera inyectar a los sistemas de transporte, almacenamiento y distribución debe cumplir con las especificaciones indicadas en la Tabla 3.

Tabla 3 Especificaciones del Gas Natural. (Norma oficial mexicana NOM-001-SECRE-2010)

Propiedad	Unidades	Zona Sur	Resto del País
Metano (CH ₄)-Mín.	%vol	83	84
Oxígeno (O ₂)-Máx	%vol	0.2	0.2
Bióxido de Carbono (CO ₂)-Máx	%vol	3	3
Nitrógeno (N ₂)-Máx	%vol	6	4
Nitrógeno. Variación máxima diaria	%vol	+/-1.5	+/-1.5
Total de inertes (CO ₂ y N ₂)-Máx	%vol	6	4
Etano-Máx	%vol	11	11
Temperatura de rocío de hidrocarburos-Máx	k (°C)	271.15 (-2)	271.15(-2)
Humedad (H ₂ O)-Máx	mg/m ³	110	110
Poder calorífico superior mín.	MJ/m ³	36.8	37.3
Poder calorífico superior Máx.	MJ/m ³	43.6	43.6
Índice Woobbe-Mín.	MJ/m ³	47.3	48.2
Índice Woobbe-Máx	MJ/m ³	53.2	53.2
Índice Wobbe-Variación máxima diaria	%	+5	+/-5
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)-Máx	mg/m ³	6	6
Azufre total (S)-Máx	mg/m ³	150	150



2.3.2 Situación del gas natural en México.

En México el encargado de la extracción y proceso de purificación del gas Natural era PEMEX, actualmente con la Reforma energética culminada en agosto del 2014, abre la posibilidad de que otros particulares puedan realizar la extracción, el proceso de purificación, distribución y venta. Las unidades encargadas del procesamiento del gas húmedo y de condensados son los centros procesadores de gas (CPG), y Gas y Petroquímica Básica (PGPB), de donde se obtiene el gas seco y el gas LP. El transporte, almacenamiento del gas natural o “seco”, son actividades reguladas por la Comisión Reguladora de Energía (CRE).

En el 2012, la demanda de gas natural se ubicó en 6,678.4 mmpcd². En el que dicho volumen correspondió un 46.6% para el sector eléctrico, 34.0% para el sector petrolero, 17.7% al sector industrial y un 1.7% al sector residencial, de servicio y auto-transporte. En un periodo de 10 años, la demanda de gas natural incrementó 4.2% anualmente.

De acuerdo con la SECURED, se estima que la demanda de gas natural crecerá en un promedio de 3.6% anual, pasando de 6,678 mmpcd en el 2012 a 11,425 en el 2027, mientras que la producción crecerá 1.3% en promedio anual, lo que provocará un incremento en las importaciones de gas natural.

En el Estado de México, existe una red de gasoductos de la cual es propietaria la empresa Tejas Gas de Toluca S.A. de C. V o FERMACA. Esta red está interconectada con la estación de compresión de Palmillas Querétaro. El mapa de esta red se puede observar en el anexo 8.1.

La capacidad del gasoducto y la distribución del gas natural en el Estado de México, se muestran en la Tabla 4 :

² mmpcd: millones de pies cúbicos diarios.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

Tabla 4 Estaciones y capacidad en el gasoducto del Estado de México (Tejas Gas de Toluca).

Estaciones	Presión mínima (kPa)	Presión máxima (kPa)	Flujo máximo (m ³ /d)
Palmillas (Interconexión)	3448	8274	2,690,100
Atlacomulco	1724	8274	141,584
Pastaje	1724	8274	283,168
Toluca	1724	8274	2,180,397

El gas natural que se distribuye a estos tres puntos es para las zonas industriales ubicadas en el Estado de México.

Desde el 2009 el precio del gas natural sufrió un descenso, en la Figura 6 se puede ver como decrece el precio, se estima que para inicios de marzo del 2015 habrá un aumento del 15% del precio del gas natural.

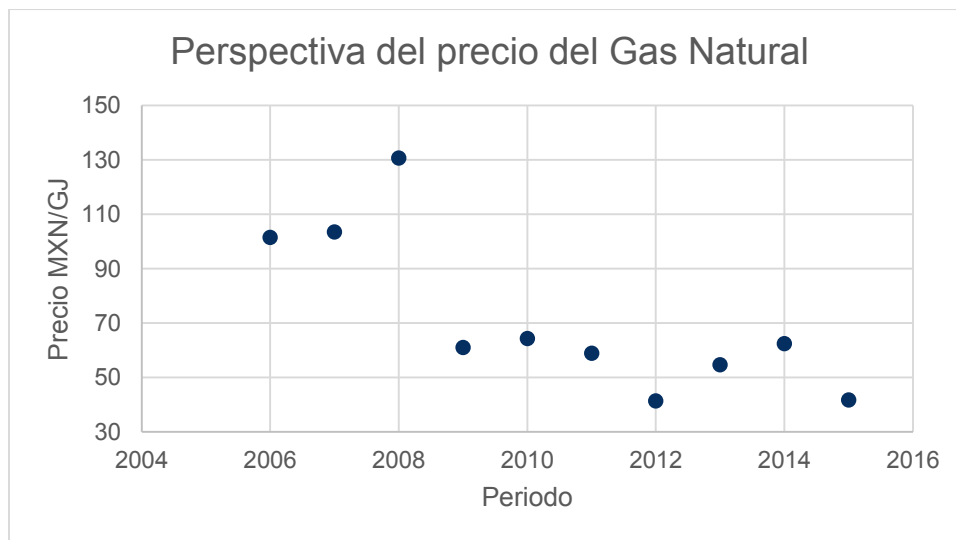


Figura 6 Precio del Gas natural en los últimos 10 años (Secretaría de Económica)



2.4 PROCESOS PARA LA LIMPIEZA Y EL MEJORAMIENTO DEL BIOGÁS.

En esta sección se hablará sobre los procesos de desulfuración y del proceso de mejoramiento del biogás.

2.4.1 Limpieza del biogás.

La limpieza del biogás se basa en la remoción de sulfuro de hidrógeno y del agua contenida en el biogás. Para aprovechar el biogás como combustible se deben cumplir con los requerimientos que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 Requerimientos mínimos de la composición del biogás para el motor y la cogeneración (Llaneza H., 2010).

Aplicación	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O	Trazas
Motor	<100 ppm	Parcial	Parcial	Si (ej. Siloxanos)
Cogeneración	<100 ppm	Parcial	Parcial	Si (ej. Siloxanos)

2.4.1.1 Remoción de agua.

El agua se puede remover por cambios en los parámetros (por ejemplo temperatura, presión) que afectan la solubilidad del agua en el gas. Los procesos para remover agua del biogás son la compresión, enfriamiento, adsorción y absorción, en la Tabla 6 se describen las características y se resaltan las ventajas y desventajas de cada proceso.



Tabla 6 Características, ventajas y desventajas para la remoción de agua (Drouillon y otros, 2008)

Ventajas y desventajas de técnicas para remover el agua.			
Método	Característica principal	Ventajas	Desventajas
Condensación Enfriador de biogás Desnebulizador Trampa	Consiste en disminuir la temperatura del biogás hasta 0.5°C para condensar el agua y secar el biogás.	Hidrocarburos pesados, polvo y aceite son removidos. Técnica simple. Es el proceso más usado en la industria.	A presión atmosférica A altas presiones el gas alcanza un punto de rocío más bajo (-18 °C) pero puede ocurrir congelamiento.
Adsorción Sílica Aluminio	Se lleva a cabo en una columna con camas de óxido de aluminio o sílica las cuales absorben el agua.	Remoción alta Bajo costo de operación Posible regeneración	Inversión más costosa: presión de 6 a 10 bar. Polvo y aceites necesitan ser removidos en el avance del proceso.
Absorción con sales higroscópicas	La sal absorbe el agua del biogás y al saturarse la sal se retira del fondo del recipiente y se sustituye nuevamente la sal.	Alta eficiencia de remoción No tóxico o peligroso	Sin regeneración.

2.4.1.2 Remoción de sulfuro de hidrógeno.

El sulfuro de hidrógeno es un gas incoloro, muy venenoso e inflamable, además que a concentraciones de 300 ppm o más puede ser letal para los seres vivos. El sulfuro de hidrógeno en disolución acuosa lleva como nombre ácido sulfúrico, este ácido provoca corrosión y también es altamente tóxico. Es necesaria la remoción de este componente para darle uso al biogás como combustible, la concentración estándar para diversas aplicaciones se muestran en la Tabla 7.



Tabla 7 Concentración estándar H₂S para diversas aplicaciones (Huynh Q.).

Aplicación	Concentración estándar H ₂ S
Boiler	1000 ppm, P=0.8-2.5 kPa.
Motores de combustión interna	100 ppm, P=0.8-2.5kPa
Turbinas	70000 ppm, P=520 kPa
Pilas de combustibles de ácido fosfórico	20 ppm
Pilas de combustible de carbonato	10 ppm
Motores Stirling	1000 ppm, P=1-14 kPa
Para Red de Gas natural	4 ppm, P>3000 kPa

El sulfuro de hidrógeno se puede remover dentro del digestor y después del digestor. Las técnicas de remoción de H₂S dentro del digestor no son usadas a nivel industrial, la descripción de cada técnica se explica a continuación.

Adición de cloruro de hierro dentro del digestor.

Un método para reducir el contenido de sulfuro de hidrogeno en el biogás es mediante la adición de una solución comercial ferrosa (Cloruro de Hierro) a la alimentación del reactor. Al enlazar el compuesto ferroso con el sulfuro se produce una fase insoluble (sulfuro de hierro) y azufre, la solución ferrosa reduce la evolución o crecimiento del sulfuro de hidrógeno (Scheper, 2003). Este método ha sido utilizado en varias plantas, pero para la operación continua este proceso se vuelve costoso. La reacción general del proceso es:



Este tipo de remoción de sulfuro de hidrógeno reduce la producción de metano. (Zicari, 2003)

Adición de aire dentro del digestor.

Esta técnica está basada en la oxidación biológica que consiste en inyectar aire al digestor, provocando una reacción de sulfuro de hidrógeno con el oxígeno para



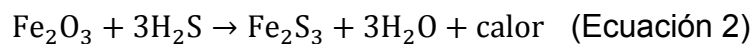
Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

formar azufre elemental y un poco de dióxido de azufre. La oxidación es catalizada por la bacteria *Thiobacillus* que normalmente está presente en la digestión. (Wellinger, y otros, 2013). Este tipo de microorganismos no requieren de inoculación y crecen en la superficie del digestato o en las orillas del digestor.

Se debe evitar la concentración mayor del 12% de aire ya que puede provocar una mezcla explosiva. Este tipo de tecnología no se aplica como tratamiento de sistemas de mejoramiento de biogás, ya que las corrientes de biogás contienen grandes cantidades de N₂ y O₂, estos componentes son más difíciles de retirar y el proceso es muy difícil de controlar (Beil, y otros, September 2010).

Remoción de Sulfuro de hidrógeno fuera del digestor con óxido de hierro.

En este proceso se lleva a cabo una reacción de sulfuro de hidrógeno con el hierro oxidado, este último está impregnado a una madera para aumentar la superficie de contacto, a este material se le conoce como “iron sponge” y de acuerdo con Abatzoglou N., Boivin Steve., 2009 el iron sponge es considerado como uno de los mejores absorbentes del sulfuro de hidrógeno (Drouillon, y otros, 2008). Este proceso ha estado disponible durante más de 100 años, el iron sponge reacciona en presencia del sulfuro de hidrógeno formando sulfuro de hierro, como se muestra en la (Ecuación 2).

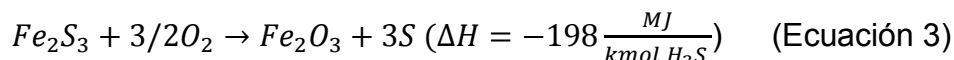


En la regeneración del óxido de hierro, como se observa en la (Ecuación 3, se adiciona una corriente de aire con una composición del 2 al 6% respecto al gas contenido en el tanque. Cabe recalcar que el iron sponge es susceptible al auto ignición cuando hay altos niveles de oxígeno debido a que la primera reacción (Ecuación 2) es exotérmica. De acuerdo con McKinsey Zicari, 2003, se requiere controlar la temperatura del proceso entre 18 °C y 46°C, para evitar la ignición de los iron sponge. Además se requiere adicionar carbonato de sodio para mantener el pH entre 8 y 10. El iron sponge se puede regenerar hasta dos veces, después de



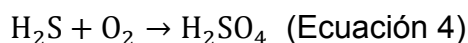
Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

este tiempo debe ser remplazado. De acuerdo con una granja en New York (Huntington's Farm), reportó que para el nivel de remoción de 1.84 kg H₂S/kgFe₂O₃ se usaban 140 kg de óxido de hierro por metro cúbico adicionando 2.29% de aire a la circulación con la finalidad de regenerar el óxido de hierro.

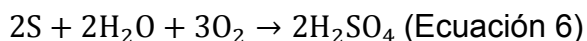
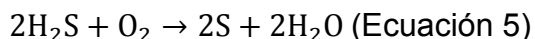


Biofiltro.

Este método es similar a la técnica de adición de aire dentro del digester anaerobio, pero este proceso se realiza en un tanque fuera del digester. El proceso consiste en añadir de 4 a 6% de aire al biogás junto con la corriente de biogás crudo al tanque, el cual es rociado con agua y nutrientes (ver Figura 7). El sulfuro de hidrógeno se absorbe en la fase líquida. El H₂S se oxida por las bacterias *Thiobacillus*, las cuales crecen en la cama del biofiltro. En la oxidación se forma sulfato y agua tal como se describe en la siguiente (Ecuación 4).



En este proceso existe una oxidación intermedia del sulfato a azufre elemental, el cual se retiene en el líquido y finalmente se vuelve a generar sulfato como se muestra en la Ecuación 5 $2S + 2H_2O + 3O_2 \rightarrow 2H_2SO_4$ (Ecuación 6 y 6. La temperatura que promueve este proceso es de aproximadamente 35°C.



Cabe señalar que durante el proceso se pueden generar explosiones si se presenta una composición de 6 a 12% de aire en el biogás (Scheper, 2003). Está técnica es muy fácil de operar. Hay varias compañías especializadas en el diseño y operación de biofiltros como por ejemplo TRG biofilters, Bohn Biofilter Corporation, Biorem Technologies, Biocube Inc., Envirogen, entre otros (Zicari, 2003).



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

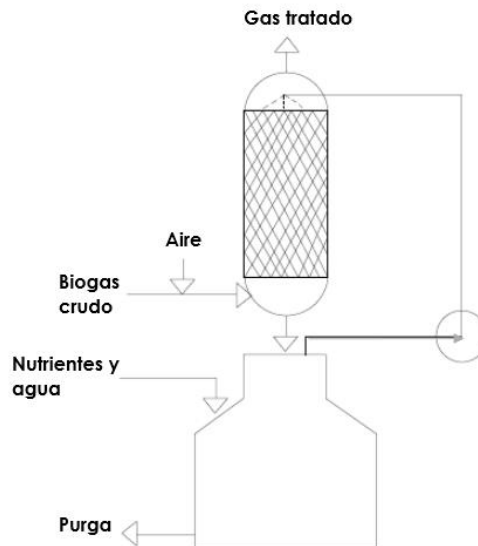


Figura 7 Biofiltro (American Biogas Council, 2014).

Adsorción con carbón activado.

El sulfuro de hidrógeno puede ser adsorbido usando carbón activado el cual en muchas ocasiones es dosificado con un catalizador de yoduro de potasio (KI) para incrementar la velocidad de reacción (Petersson, 2013). Es muy frecuente el uso del carbón activado por su alta área superficial, su porosidad y sus propiedades catalíticas.

Al biogás se le añade de 4 a 6 % de aire antes de entrar a la cama de carbón, formando así azufre elemental el cual será absorbido por el carbón activado. Para obtener una alta eficiencia, se debe operar a una presión de 700 a 800 kPa y en un intervalo de temperaturas de 50 a 70°C. Esta temperatura es fácil de alcanzar después de la compresión. Si se requiere un sistema continuo, el sistema consistirá en dos recipientes como se ve en la Figura 8, un recipiente servirá para la adsorción del H₂S, mientras el segundo regenerará el carbón activado mediante una corriente de nitrógeno o vapor.

Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.



Figura 8 Recipientes de carbón activado para la remoción de H₂S (American Biogas Council).

En la Tabla 8 se muestran todos los métodos para remover sulfuro de hidrógeno del biogás, mostrando las ventajas y las desventajas de cada una de ellas.

Tabla 8 Ventajas y desventajas de los métodos de remoción de sulfuro de hidrógeno. (Abatzoglou, y otros, 2009)

Ventajas y desventajas en los métodos de remoción de sulfuro de hidrógeno.		
Método	Ventajas	Desventajas
Biológico con aire (En un filtro/scrubber y digestor)	Inversión barata, bajos requerimientos de electricidad y calor. No requiere químicos o equipos requeridos. Operación y mantenimiento simple. Remueve también CO ₂ .	Exceso de O ₂ /N ₂ en el biogás lo cual implica dificultad en una limpieza adicional



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

Método	Ventajas	Desventajas
FeCl₃/FeCl₂/FeSO₄ (dentro del digester)	Inversión baja para el tanque y la bomba dosificadora. Bajos requerimiento de electricidad y calor. Operación y mantenimiento simple. Técnica compacta. Sin aire en el biogás.	Baja eficiencia de remoción. Costo de operación alta. Cambios en el pH y temperatura que no benefician al proceso de digestión anaerobia.
Cama de Fe₂O₂/Fe(OH)₃. Iron Sponge o pellets	Alta eficiencia de remoción >99%. Bajo costo de inversión. Simple	Sensible para el agua. Alto costo de operación. La regeneración es peligrosa por la ignición de la viruta. En cada ciclo la reacción en la interface se reduce. El polvo liberado puede ser tóxico.
Filtro Biológico	Alta remoción >97%. Bajos costos de operación.	No se pueden implementar técnicas adicionales para la remoción de sulfuro de hidrógeno, debido a la presencia de O ₂ y N ₂ .
Adsorción por carbón activado (Impregnado con yoduro de potasio del 1-5%	Alta eficiencia de remoción. Alta velocidad de purificación. Temperatura de operación baja. Técnicamente compacta. Remueve también el dióxido de carbono.	Altos costos de inversión y operación. Pérdida de metano. Regeneración a 450 °C.



2.4.2 Mejoramiento del biogás

El proceso de mejoramiento o refinación de biogás (Up-grading), se enfoca principalmente a la remoción del dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y agua (H_2O), hasta obtener biometano, biogás con alto poder calorífico (Scholz y otros, 2012).

Las remociones de las impurezas se hacen con las tecnologías de separación por membranas, absorción con compuestos orgánicos, absorción química, adsorción por cambio de presión (PSA) y absorción con agua (Water Scrubber), (Baur Fredric, 2012). En la Figura 9, se puede apreciar el proceso general de purificación de biogás.

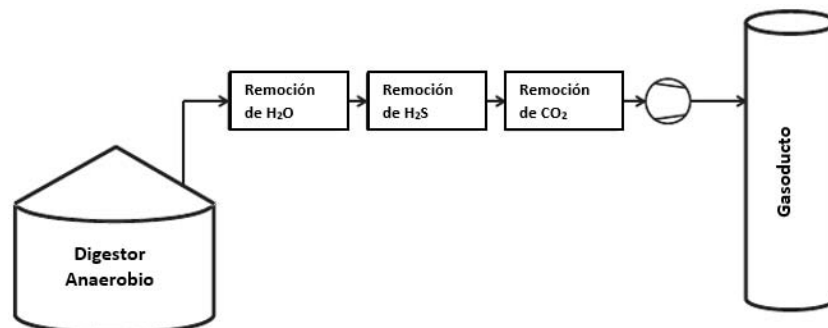


Figura 9 Proceso de purificación de biogás, el CO_2 , H_2S , y el vapor de agua deben ser eliminados antes de que se inyecte a la red de gas natural (Scholz et al., 2012).

Las tecnologías para el mejoramiento del biogás, que predominaron durante el 2012 en el mercado son: la tecnología basada en la absorción con agua (Water Scrubber, WSC) y la de adsorción por cambio de presión (PSA), pero para el año 2014, se ha visto una disminución sobre la preferencia de estas tecnologías. En la Figura 10, se puede observar el número de plantas instaladas por cada tecnología existente en el mercado desde el año 1986 al año 2014.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

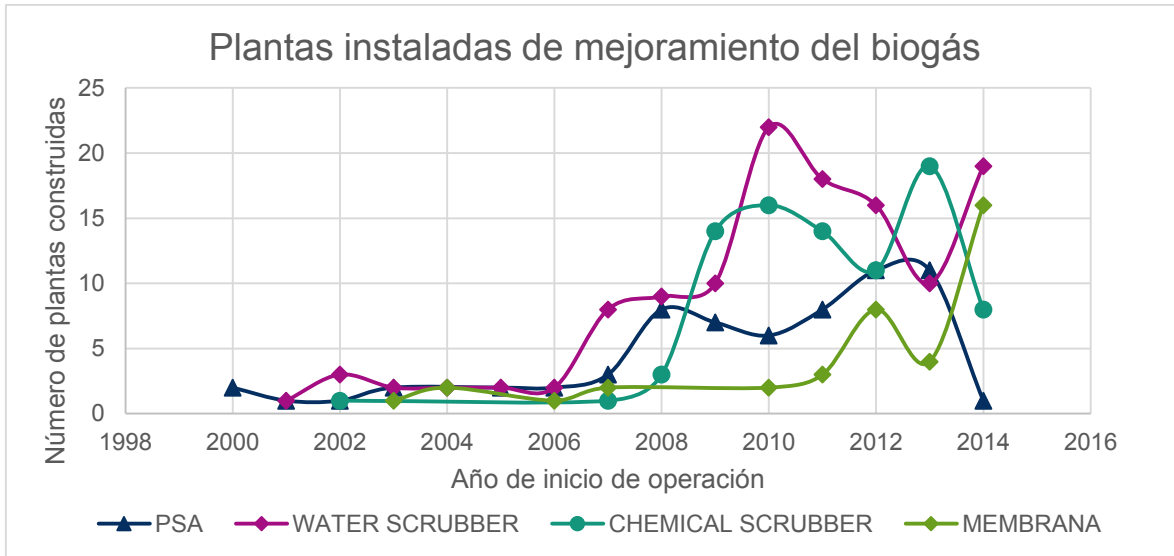


Figura 10 Plantas instaladas para el mejoramiento de biogás, en donde se muestra el número de plantas de cada tecnología existente en el mercado mundial (Peterson, 2014).

En el 2012, según Peterson (2012) había en operación 347 plantas de purificación de biogás en todo el mundo, y se puede apreciar de mejor manera en la Figura 11, el número de plantas en cada país.³ Alemania es el país que tiene y hace uso de la tecnología de purificación de biogás y la tecnología que más ocupa es la absorción con agua.

³ Cabe señalar que en la Figura 9 se muestran menos plantas en comparación con la gráfica 2, debido a que no hay información disponible de las tecnologías en varios países.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

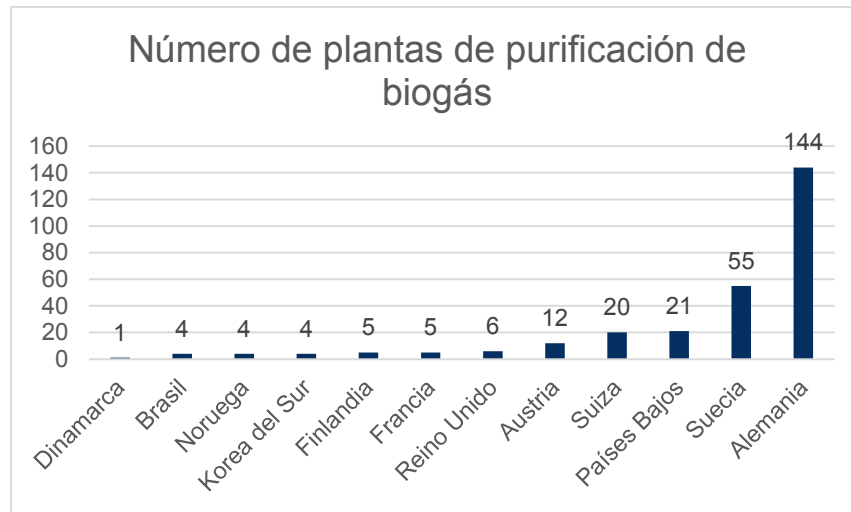


Figura 11 Número de plantas de purificación de biogás en cada país (Person, 2014).

A continuación se describe el proceso para cada tecnología mencionada anteriormente.

2.4.2.1 Absorción química con aminas.

La absorción química con aminas (Amina Scrubbing) consiste en el lavado del biogás mediante aminas para remover CO_2 , H_2S y agua. Las aminas más comunes para este proceso son la 3,4 metidietanolamina (MDEA), dietanolamina (DEA) y la monoetanolamina (MEA). Actualmente en la Industria, la amina que más se utiliza es una mezcla de aMDEA y piperazine (PZ). Las primeras aminas fueron hechas por BASF, aunque actualmente también las producen DOW, Chemicals y Taminco (Baur Fredric, 2012).

El proceso consiste en un absorbedor al cual se le inyecta una solución de amina (1, siguiendo la numeración de la figura 12) en exceso que reacciona exotérmicamente con el CO_2 y H_2S . La reacción es extremadamente selectiva por lo que la cantidad absorbida de metano en el líquido es muy baja entonces hay una alta recuperación de metano, obteniendo una corriente rica en metano (3) (Technology, 2012). La presión de operación del absorbedor es de 1 a 2 bar (Baur Fredric, 2012).

Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

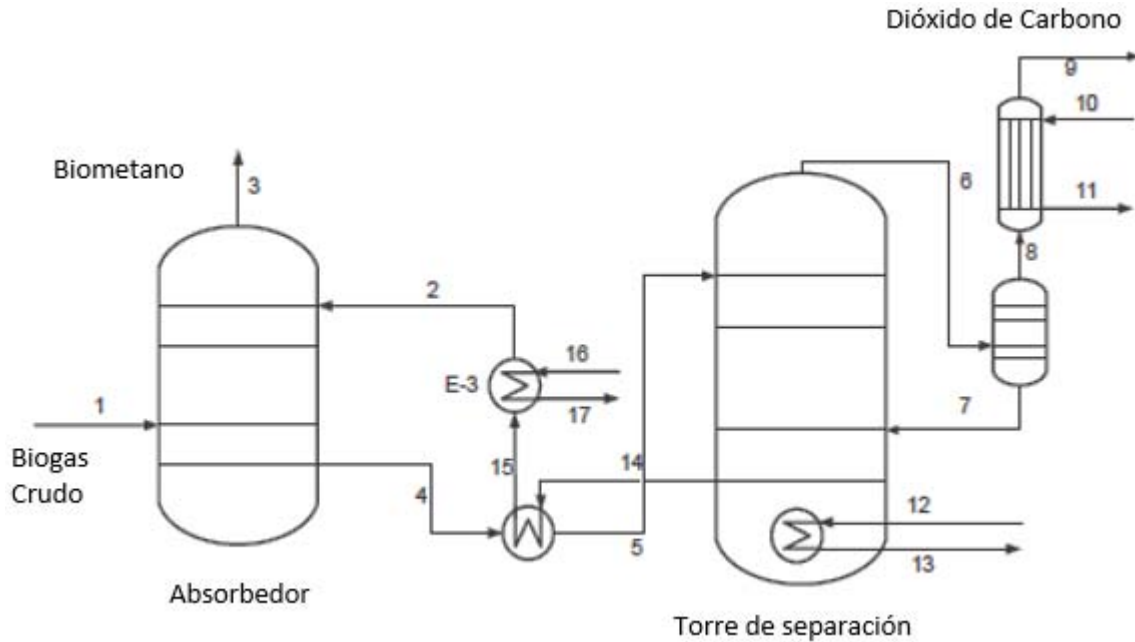


Figura 12 Proceso de absorción química con aminas (Bauer Fredric, et al., 2013)

En la Tabla 9, se describen las corrientes del proceso.

Tabla 9 Descripción de las corrientes

Corriente	1	2	3	4	5	6
Descripción	Biogás proveniente del digester anaerobio	Solución de amina	Biometano	Amina con CO ₂ y H ₂ S	Amina con CO ₂ y H ₂ S con una temperatura mayor	CO ₂ con trazas de amina
Corriente	7	8	9	12,13,16,17	14, 15	
Descripción	Condensado (solución de amina)	CO ₂ y H ₂ S	CO ₂	Calor (vapor, agua caliente)	Solución de amina regenerada	



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

La mezcla de aminas con CO_2 y H_2S (4) se envía a una torre de separación, la cual fluye hasta el fondo de la columna en donde hay un rehervidor que proporciona el calor necesario para mejorar la desorción del CO_2 y H_2S de la solución de amina, el rehervidor trabaja a una temperatura de 120 a 150°C. El agua con trazas de amina se elimina por medio de un condensador, para ingresarlo nuevamente a la torre de separación (14). En este proceso se debe mantener controlado el pH básico para evitar el crecimiento bacteriano y así poder usar cualquier tipo de empaque para las columnas.

2.4.2.2 Adsorción por cambio de presión.

Adsorción por cambio de presión (PSA por sus siglas en inglés) es un método que se usa para separar CO_2 , H_2S , y agua del biogás. El proceso consiste en comprimir el biogás hasta elevar su presión y alimentarlo a una columna de adsorción en donde sólo se retiene el dióxido de carbono en un material que está hecho comúnmente de carbón activado, silicagel, alumina o zeolita. Debido a la selectividad de cada material el metano no queda retenido y fluye a través de la columna. Hasta que el material de la columna se satura con dióxido de carbono la presión se libera y el dióxido de carbono puede liberarse y así se puede enviar a una corriente de salida. (Ryckebosch E., *et al.*, 2011). En la Figura 13, se puede apreciar el diagrama de proceso simplificado del mejoramiento de biogás por medio de la tecnología PSA.

Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

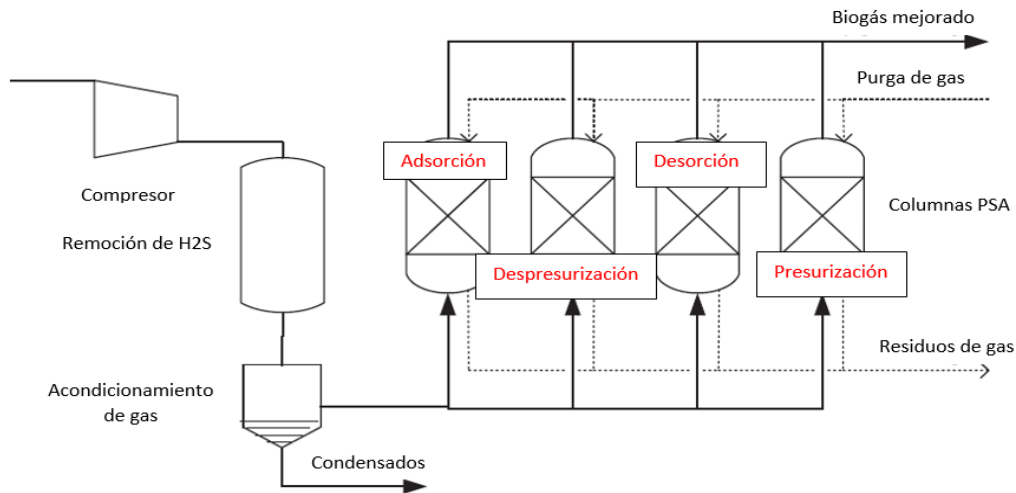


Figura 13 Diagrama de Proceso de la adsorción por cambio de presión, (Scholz Marco, et al, 2012; Bauer Fredric, et al, 2013).

El diseño común para PSA, incluye cuatro columnas, la primera siempre se ocupa para la adsorción y las otras tres en las diferentes fases de regeneración de la cama de carbón activado, despresurización, desorción y presurización. Para reducir la pérdida de metano durante el proceso, las columnas están interconectadas de modo que el flujo de salida del gas de una columna durante la purga se usa para presurizar la otra columna igualando su presión ya sea con biometano o biogás crudo, de esta manera también se reduce el consumo de energía del proceso. El ciclo de una columna PSA, oscila entre los 2 y 10 minutos.

El tipo de adsorbente es crucial para el funcionamiento de la tecnología. El adsorbente es un sólido poroso con una gran área específica para maximizar el contacto con el gas.

La investigación y el desarrollo de la tecnología de PSA, se enfoca a minimizar las unidades de PSA, optimizar la tecnologías para aplicaciones a pequeña escala, reducir el uso de energía y combinar diferentes adsorbentes y sus características, y la integración de la separación en una sola columna.

2.4.2.3 Absorción con agua.

La absorción con agua, consiste en la remoción de H_2S , CO_2 y agua contenida en el biogás para obtener una corriente rica en metano (biometano).

El proceso radica en incrementar la presión de la corriente mediante un compresor que opera a presiones de 6 a 10 bar (a)⁴. El biogás presurizado se inyecta por el fondo de la columna de absorción y el agua por el domo de la columna de manera que estén a contraflujo para minimizar el consumo de energía, así como también evitar la pérdida de metano, como se puede observar en la Figura 14 (Baur Fredric, 2012).

El agua que proviene de la columna de absorción tiene que equilibrar su presión con la presión parcial más alta del dióxido de carbono y la presión más baja del metano, para obtener el mayor contenido de dióxido de carbono en el agua (fase líquida) y la menor cantidad de metano en el agua.

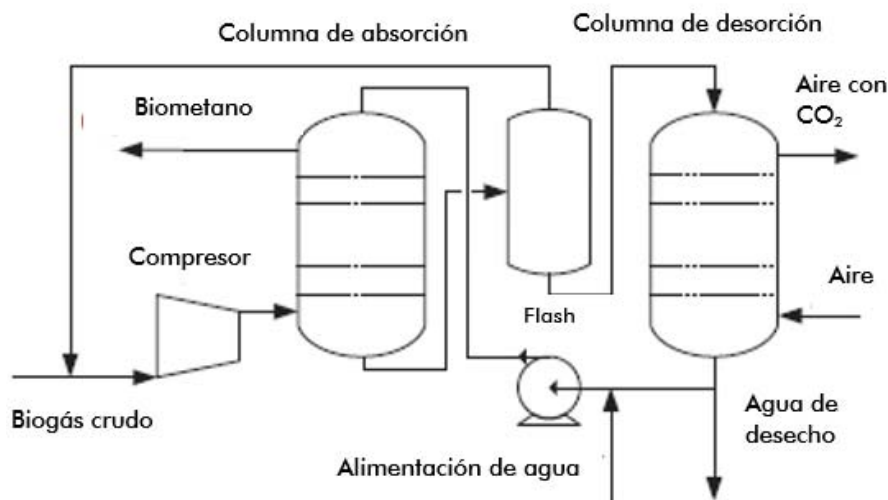


Figura 14 Esquema del proceso de absorción con agua (Baur Fredric, 2012)

⁴ (a) Presión absoluta



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

El relleno de la columna de absorción contiene empaque al azar, con la finalidad de incrementar el contacto superficial entre el agua y el biogás asegurando la absorción eficiente del dióxido de carbono como sea posible en el agua (Baur Fredric, 2012).

La corriente que sale del absorbedor se manda a la columna flash en donde la presión disminuye a un intervalo de 2.5 y 3.5 bar (a) con el propósito de liberar el CO_2 y CH_4 del agua, esta corriente gaseosa se recircula a la alimentación del compresor. La columna flash no está empacada, y está diseñada con un diámetro suficientemente amplio para que la velocidad vertical del agua decrezca hasta el punto que incluso las burbujas pequeñas de gas sean capaces de elevarse en lugar de ser arrastradas a la columna de desorción. La columna flash debe estar diseñada de manera que el agua no regrese al compresor (Baur Fredric, 2012).

La corriente de agua con dióxido de carbono y con menos de 1% de metano, se inyectan al domo de la columna de desorción, en contraflujo de una corriente de aire, que entra por el fondo de la columna (Baur Fredric, 2012). La columna de desorción también está empacada para incrementar el área de contacto entre el aire y el agua. El bajo porcentaje de dióxido de carbono en el aire y una disminución en la presión parcial del mismo disminuye la solubilidad del dióxido de carbono en el agua por lo que facilita la separación del CO_2 del agua. El agua libre de dióxido de carbono se bombea a la columna de absorción (Baur Fredric, 2012).

La Tabla 10 muestra la cantidad de agua necesaria para mejorar 100 N/m^3 por hora de biogás para obtener un biometano con menos del 2% de CO_2 .

Tabla 10 Flujo de agua necesario para la purificación de 100 NM³/h de biogás bruto Bauer Fredric, et al., 2013.

Presión (bar)	Temperatura del agua (°C)	Flujo de agua (m ³ /h)
8	20	210-230
8	14	180-200
6.5	14	210-230

2.4.2.4 Absorción con compuestos orgánicos.

La absorción con compuestos orgánicos (Organic Physical scrubbing), es un proceso en el cual se remueven CO₂, H₂S y agua del biogás, principalmente. Es un proceso de absorción muy similar a la absorción con agua, la diferencia radica en el tipo de absorbente, en este caso el reactivo más usado es el polietilenglicol. El dióxido de carbono es más soluble en el polietilenglicol que en agua, por lo que se requiere un menor flujo de este solvente para el proceso ver Figura 15 (Baur Fredric, 2012).

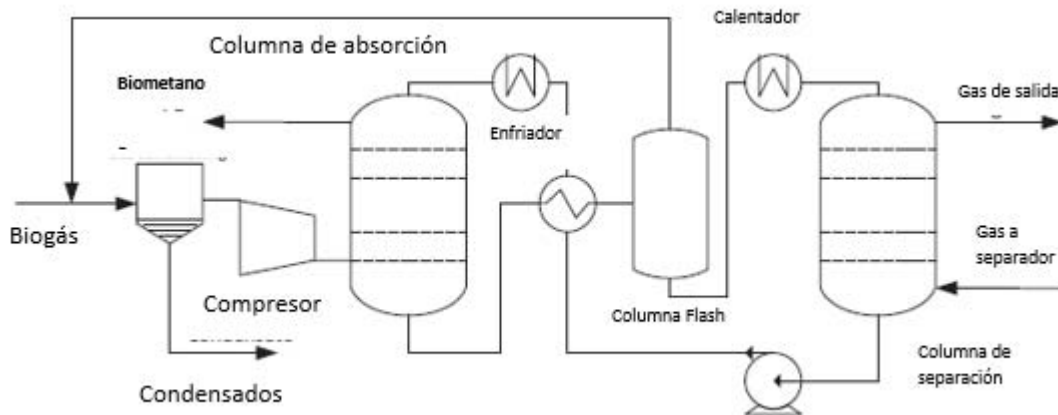


Figura 15 Diagrama de flujo del proceso simplificado de la absorción con polietilenglicol.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

El proceso consiste en comprimir el biogás a presiones de 7 a 8 bar (Baur Fredric, 2012).

2.4.2.5 Separación por membranas.

El proceso de separación con membranas consiste en la remoción de agua y sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono. En casos donde haya presencia de amoníaco, siloxanos y compuestos orgánicos volátiles en grandes concentraciones, estos compuestos se remueven después del mejoramiento de biogás. El agua se retira para prevenir la condensación durante la compresión mediante condensación o refrigeración y el H_2S se retira por medio de carbón activado. La compresión se lleva a cabo a presiones de 6 a 20 bar, está presión depende de los requerimientos específicos del sitio, del diseño y el tipo de manufactura de las membranas (Baur Fredric, 2012). El proceso de mejoramiento de biogás por medio de membranas se puede observar en la Figura 16.

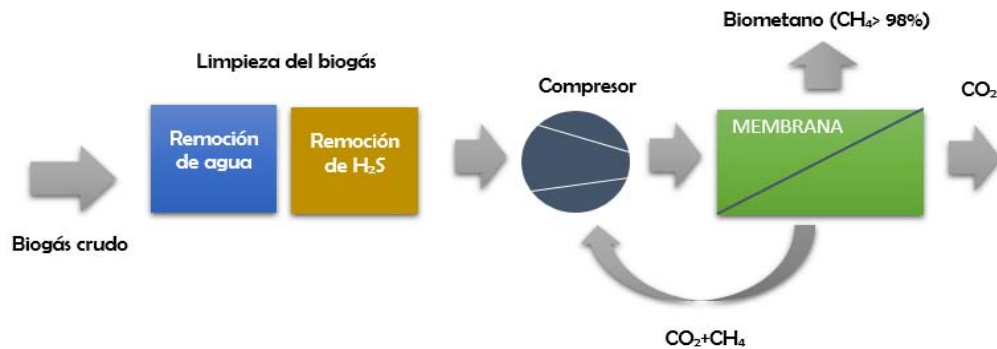


Figura 16 Diseño típico del mejoramiento de biogás con membranas (Baur Fredric, 2012).

Una membrana es un filtro denso hecho de polímero principalmente, en el cual se pueden separar el CO_2 y H_2S del biogás, para obtener una corriente rica en metano (Baur Fredric, 2012). La separación de los compuestos se basa en la velocidad de difusión que tienen las moléculas, las cuales dependen de la diferencia de los tamaños de las moléculas del gas, esta diferencia permite que las moléculas pequeñas como el CO_2 y H_2S puedan penetrar a través de la membrana más rápido,

Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

mientras que las moléculas más grandes como el metano, al tener una velocidad de difusión, menor se retengan en las fibras un poco más de tiempo como se puede observar en la Figura 17 (Persson Margareat, 2006).

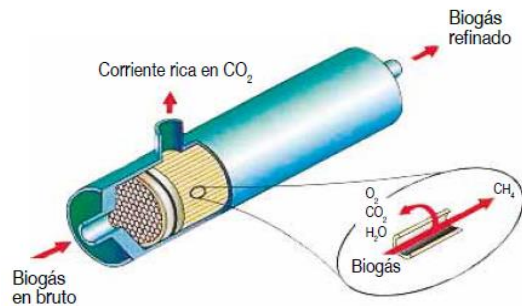


Figura 17 Separación en la membrana (Folleto DMT Carborex RMS)

El nivel de separación de los componentes en una membrana se determina mediante la Ley de Fick que determina el transporte de las moléculas gaseosas que atraviesan una superficie como el Flux de compuesto a estudiar, ver Ecuación 7 (Baur Fredric, 2012).

$$J_{CO_2} = \frac{D_{CO_2} K_{CO_2} \Delta p}{l} \quad (\text{Ecuación 7})$$

- J_i Flux
- K Solubilidad del CO_2 en el polímero
- D Coeficiente de difusión del CO_2 a través del polímero.
- Δp Diferencia de presión parcial entre la corriente de entrada y la parte permeada
- l Grosor de la membrana

La difusión de las moléculas depende de la temperatura y de la presión. Por ejemplo la transferencia de las moléculas a través de las membranas incrementa con el aumento de temperatura. La permeación es el producto del coeficiente de difusión y la solubilidad del gas en el polímero, para una buena permeación es necesaria una fuerza motriz, esta fuerza se puede dar mediante tres métodos, que es la compresión en la alimentación (la más usada en el mercado), el vacío del lado del permeado y el barrido de gases, el permeado es el gas residual con bajo contenido de metano (Persson Margareat, 2006).



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

En el mercado hay tres tipos en los arreglos de las etapas de separación por membranas, en primer arreglo, Figura 18, sólo hay una etapa de separación de membrana donde no hay recirculación de biogás y el consumo de energía es bajo para la compresión, aunque hay pérdidas de metano considerables y por lo cual es importante que la membrana tenga una mejor selectividad sobre los componentes a separar. En el arreglo dos, Figura 19, se usan más unidades de mejoramiento de biogás, este diseño incrementa la recuperación de metano comparado con el primer arreglo. En este caso el permeado de la primera etapa se retira y el flujo de la segunda etapa se recircula al compresor para minimizar la pérdida de metano, por lo cual aumenta el consumo de energía. En el tercer diseño, Figura 20, el gas que no pasó por la primera etapa se refina en la membrana de la segunda etapa, para obtener un gas con una pureza de más del 97% de metano. El permeado de la primera etapa es refinado en la membrana de la tercera etapa para minimizar la concentración de metano en el gas de salida. La corriente permeada de la segunda etapa y el gas retenido en la tercera, se combinan y se recirculan hacia el compresor.

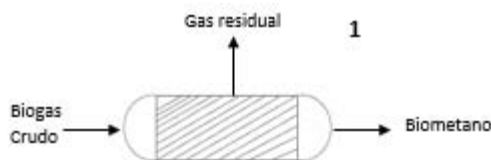


Figura 18 Arreglo 1 de las etapas de separación por membranas.

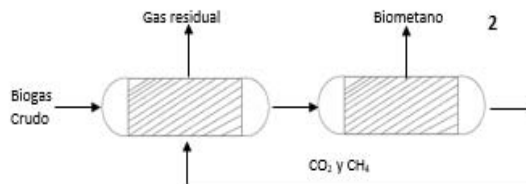


Figura 19 Arreglo dos, con dos etapas de separación por membranas.

Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

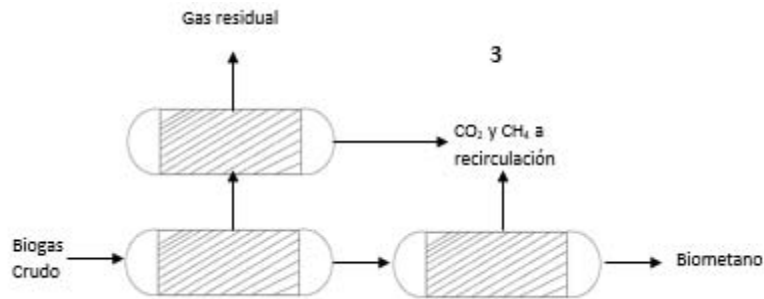


Figura 20 Diseño tres, en el cual hay tres etapas de membranas para una óptima separación del metano.

Existen tres tipos de módulos de membranas para la permeación de gases, fibras huecas (hollow fiber), membrana en forma de espiral (spiral wound) y membranas tipo tubulares (Scholz , y otros, 2012), pero la más usada para el mejoramiento del biogás es la de fibras huecas.

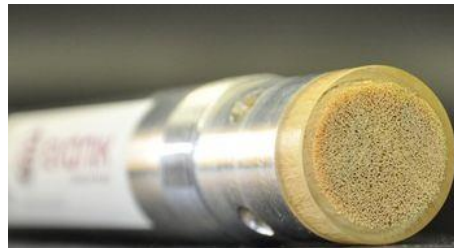


Figura 21 Membranas de fibras huecas (Hollow fiber) (Greencarcongress).

La geometría y el material de los módulos de membranas determinan el nivel de permeación de los gases como también el área requerida para el proceso de mejoramiento del biogás. En la Tabla 11, podemos observar las características de cada módulo, los costos y el pretratamiento requerido (Scholz , y otros, 2012).



Tabla 11 Características de los módulos de membrana (Baur Fredric, 2012)

	Unidad	Hollow Fiber	Spiral Woud	Envelope
Densidad del relleno	m ² /m ³	<10000	200-1000	30-500
Área aproximada por módulo	m ²	300-600	20-40	5-20
Costo por modulo	US-\$/m ²	2-10	10-50	50-200
Pretratamiento requerido		Alto	Razonable	Mínimo

De acuerdo con (Baur Fredric, 2012), el tiempo de vida estimado para las membranas es alrededor de 5 a 10 años.

2.4.2.6 Separación Criogénica.

La separación criogénica, consiste en separar contaminantes del biogás mediante condensaciones y destilaciones fraccionales a bajas temperaturas. El proceso consiste en comprimir el biogás a una presión de aproximadamente 80 bar (Persson Margareat, 2006). La compresión se realiza en múltiples etapas. Primero se enfría el biogás mediante intercambiadores de calor a temperaturas de -45°C, hasta alcanzar una temperatura criogénica (de aproximadamente -170°C) en la cual se condensa el CO₂ y se separa del gas. El gas que se obtiene de la separación criogénica contiene más del 97% de metano (Biogas Scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context, 2003). Cabe señalar que en el 2006, este método sólo se había probado en plantas pilotos en Europa, pero en el 2012 Person reportó una planta con separación criogénica en la lista de plantas de purificación con biogás, ubicada en los países bajos. Este tipo de tecnología requiere diversos equipos para la separación, por lo cual se podría volver muy cara, su implementación y operación (Persson Margareat, 2006).



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

2.5 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS

El biogás necesita un pretratamiento, para remover, agua, sulfuro de hidrógeno y siloxanos, principalmente para la generación de energía eléctrica (Wellinger, y otros, 2013). Los equipos que se usan para generar electricidad a partir del biogás son los motores de combustión interna acoplados con un generador eléctrico, pero también se usan otras máquinas como las turbinas de gas, microturbina, Motor Stirling y celdas de combustible (Wellinger, y otros, 2013). En la Tabla 12, se puede observar una comparación de las capacidades, eficiencia y costos de las tecnologías comunes para la generación de energía eléctrica a partir del biogás.

Tabla 12 Comparación de equipos para la generación de energía eléctrica a partir del biogás (Kaparaju y otros, 2013).

Parámetro	Motor	Turbina de Gas	Micro-Turbina	Motor-Stirling	Celdas de combustible
Capacidad (kW)	110-3000	3500-15000	30-300	<150	300-1500
Eficiencia eléctrica (%)	30-42	25-40	25-30	30-40	40-45
Eficiencia térmica (%) ⁵	40-50	30-50	30-35	35-40	30-40
Eficiencia general del sistema (%)	70-80	70-75	55-65	65-80	75-80
Control de producción (energía/calor)	-----	Muy buena	Muy buena	Muy buena	Buena
Purificación de Biogás requerida	Mediana	Mediana	Mediana	Medio baja	Alta
Emisiones de NOx	Alta 500-700 mg/Nm ³	Baja 25-50 mg/Nm ³ Gas de combustión	Baja	Muy baja	Extremadamente baja (3 mg/Nm ³ gas de combustión)
Fuente de energía alternativa	Líquido-gas	Gas Natural	Gas natural, Keroseno, petróleo	Gas natural, petróleo	Gas natural
Costos de Inversión (€/kWel) ⁶	400-1100	900-1500	600-1200	1300-1500	3000-4000
Costo de operación y mantenimiento (€/kWel) ⁷	0.01-0.02	0.005-0.010	0.008-0.015	0.003-0.005	0.003-0.010

⁵ La recuperación de calor se calcula como un porcentaje de entrada de combustible.

⁶ Costos de instalación varían según el tipo y la cantidad de equipos auxiliares.

⁷ Los costos de mantenimiento dependen de la calidad del gas.

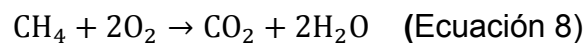


En el grupo de trabajo, se desarrolló un estudio sobre la selección de equipos para la generación de energía eléctrica, Coello (2014), menciona que la tecnología más viable para generar energía eléctrica a partir del biogás generado en digestores anaerobios son los moto-generadores, por lo que este tipo de equipos fueron considerados en el presente trabajo.

2.5.1 Motores de combustión interna y generadores eléctricos.

Un motor de combustión es una máquina térmica que transforma la energía química del combustible en calor (combustión) y convirtiendo esa energía en trabajo mecánico.

La combustión es una reacción de oxidación de combustibles, donde en el caso del biogás se oxida en presencia de aire, la reacción puede representarse en la Ecuación 8:



Este tipo de motores son utilizados para proporcionar energía tanto a automóviles, bombas, generadores, entre otros equipos. El motor de combustión interna se caracteriza por que los gases procedentes de la combustión están en contacto directo con los órganos móviles del motor. Otra característica es que estos motores en cada ciclo aspiran aire, luego se adiciona el combustible y se quema en el interior del motor, finalmente los gases quemados son expulsados del sistema y se aspira nuevamente aire, por lo tanto se trata de un ciclo abierto (Flores, 2010). Se dice que un motor es alternativo, cuando el motor está basado en el sistema pistón (Muñoz, y otros, 1999)

Los motores de combustión interna se pueden clasificar en encendido por chispa o provocado (MEP) y encendido por compresión (MEC) (Muñoz, y otros, 1999). En los MEP, el combustible y el aire se introducen a la cámara de combustión en forma de mezcla gaseosa el cual requiere un sistema de encendido ya sea por ayuda de

Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

una chispa eléctrica o de una bujía (Chispa), los MEP son nombrados también “motores Otto”.

Los motores MEC, conocidos como “motores diésel”, son en los que se alimenta por inyección en donde el aire y el combustible se introducen por separado, mezclándose en la cámara de combustión donde se produce un autoencendido debido a que la mezcla se inflama por superar la temperatura de ignición durante la compresión (Román, 1984)

Los elementos de los motores Otto y Diésel son muy parecidas, en lo que difieren es en su funcionamiento, estas diferencias se ilustran en la siguiente Tabla 13.

Tabla 13 Diferencias entre el Motor Diésel y Otto (García, 2010).

	Tipo de Motor	
Tipo de Ciclo	Explosión/Otto	Compresión/Diesel
Ignición	Chispa	Auto ignición
Sistema de Encendido	Si	No
Relación de Compresión (Explosión/Combustión)	De 6.5-11 de toda la mezcla	De 12 a 22, a medida que se inyecta el diésel
Equipo de Inyección	A veces	Siempre
Construcción	Ligera y simple	Pesada

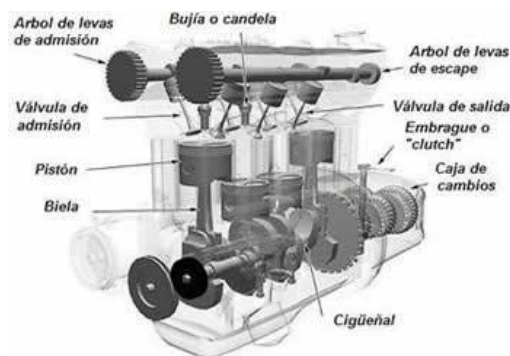


Figura 22 Esquema general de un motor de combustión interna Fuente www.cneq.unam.mx.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

En la combustión interna la obtención de trabajo mecánico se produce en secuencia cíclica, los ciclos teóricos o de referencia son los creados por Otto y Diésel, los cuales llevan su nombre. El funcionamiento de estos motores es por medio de ciclos abiertos de cuatro y dos tiempos. El ciclo de cuatro tiempos es el que se usa genéricamente y se describe a continuación.

2.5.1.1 Ciclo de cuatro tiempos.

De acuerdo con (Muñoz, y otros, 1999), los ciclos de cuatro tiempos se describen de la siguiente manera.

Admisión. El pistón se desplaza del punto muerto superior (PMS) al punto muerto inferior (PMI), creando una depresión en el cilindro, facilitando así el llenado de la mezcla de combustible y aire.

Compresión. El pistón se desplaza desde PMI hasta el PMS con las válvulas cerradas comprimiendo la mezcla.

Expansión. La mezcla se enciende antes de que alcance el PMS, por lo cual la presión ejercida por los gases desplaza el pistón hasta el PMI, haciendo girar el cigüeñal. En este tiempo en el ciclo Otto produce energía.

Escape. Es el último tiempo del ciclo, en donde el pistón se desplaza del PMI al PMS, en este tiempo al abrirse la válvula de escape se permite la expulsión de los gases quemados. El ciclo se reanuda de inmediato en forma sucesiva.

Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.



Figura 23 Nomenclatura para motores de combustión interna alternativos.

Las diferencias en los funcionamientos entre el motor diésel y Otto dentro del ciclo de cuatro tiempos se puede apreciar en la siguiente Tabla 14.

Tabla 14 Tabla comparativa de motor Otto y Diésel

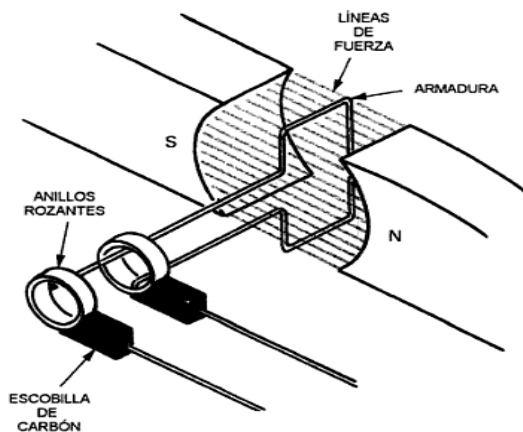
Otto MEP	Diésel MEC
1° Tiempo (ADMISIÓN)	
Se aspira la mezcla aire-gasolina en cantidad graduada por el acelerador	Se aspira y se llena por completo el cilindro con el aire.
2° Tiempo (COMPRESIÓN)	
Moderada por medio de la mezcla	Elevada por medio del aire.
3° Tiempo. (EXPLOSIÓN-COMBUSTIÓN)	
Encendido por una chispa en la bujía	Inyección de diésel, en cantidad graduada por el acelerador.
Se produce la explosión de toda la mezcla	Auto ignición por el calor de la compresión.
	Combustión a medida que entra.
4° Tiempo (Escape)	
Idéntico en los dos sistemas	

Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

De acuerdo con Wellinger y otros (2013) los motores diésel son más eficientes para la generación de poder que puede haber actualmente en el mercado.

El motor tiene como función generar energía mecánica a partir de la combustión química del biogás. Para generar energía eléctrica, se requiere un generador eléctrico también llamado alternador, que es un aparato que usa la energía mecánica del motor para inducir el movimiento de las cargas presentes en el alambre de cobre (armadura) de la bobina para generar una corriente de energía alterna (Enriquez, 2004)

El generador eléctrico se basa en el principio de Faraday de "inducción electromagnética" la cual establece que si se mueve un conductor eléctrico



(armadura) a través de un campo magnético (generado por un par de imanes, S,N), se inducirá una corriente eléctrica que fluirá a través del conductor (anillos rozantes), en la Figura 24 se ilustra el principio de Faraday (Enriquez, 2004)

Figura 24 Funcionamiento de un generador eléctrico basado en el principio de Faraday de "Inducción electromagnética" (Enriquez, 2004).

De acuerdo con ESCAP, 2007, para generar 1 kW-h de electricidad con un generador se requiere alrededor de 1 metro cúbico de biogás. En el mercado actual los motores de combustión interna y los generadores, vienen acoplados y se les conoce como moto-generadores, como el que se ilustra en la Figura 25.

Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.



Figura 25 Moto-generador de la marca AquaLimpia.

La generación estimada de energía eléctrica para distintas capacidades de moto generador, se pueden observar en la siguiente Tabla 15.

Tabla 15 Generación de energía eléctrica de acuerdo a las capacidades de los moto-generadores (Ochoa, y otros, 2007).

CAPACIDAD DEL MOTO-GENERADOR EN KW	GENERACIÓN ESTIMADA DE ENERGÍA ELÉCTRICA (CONCENTRACIÓN DE METANO AL 50% KW/H)
60	48.43
50	35.47
40	30.52
30	24.38
25	17.09
13	11.47



2.6 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS Y TOMA DE DECISIÓN.

En la literatura existen diversas metodologías para la evaluación de proyectos que pueden ser clasificadas en función del fin último que se le dará al resultado de la evaluación. Siendo así, las metodologías se pueden clasificar para la evaluación técnica, financiera, socioeconómica y ambiental de proyectos. La evaluación técnica tiende a ser muy específica ya que se trata de distintas alternativas para un mismo fin. En este sentido la evaluación tecnológica consiste en definir un objetivo que se pretende lograr con el uso de una u otra tecnología y a partir de ciertos criterios cuantificables o no cuantificables, emitir un juicio sobre la tecnología más adecuada para obtener los resultados más satisfactorios para el “usuario” (Pérez Valle, 2014).

Una tecnología se puede definir de acuerdo con Giral y Gonzáles (1980) como “el conjunto organizado de conocimientos aplicados para alcanzar un objetivo específico, generalmente el de producir y distribuir un bien o servicio” (Valle, 2014).

La evaluación financiera pretende determinar si la inversión es o no redituable en términos netamente monetarios para el inversionista. La evaluación ambiental persigue determinar si el impacto del proyecto tendrá impactos al ambiente, normalmente esta evaluación se encuentra acotada por leyes, reglamentos y normas nacionales que apliquen al proyecto (Valle, 2014).

Según Harris (1980) citado por (Coello, 2014) la toma de decisión es el estudio de la identificación y selección de alternativas, basado en los valores y preferencias del tomador de decisión. La toma de decisión implica la selección de la alternativa que se ajuste de mejor manera a las metas, objetivos del usuario. Este proceso consiste en minimizar los riesgos de pérdidas financieras (Valle, 2014).

El proceso de toma de decisión se puede dividir en las siguientes etapas (Coello, 2014; Valle, 2014):



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

1. Definición del problema: Identificar las causas, límites expresándolos de manera clara en un enunciado que describa las condiciones iniciales como las deseadas. Tener una descripción de la problemática a resolver.
2. Identificación de alternativas: Recabar toda la información posible que sea significativa para la evaluación, se obtienen datos de diseño, datos históricos, entre otros. Las alternativas ofrecen diferentes opciones para cambiar las condiciones iniciales en las deseadas.
3. Definición de Criterios: Es un punto muy importante a llevar en la evaluación y debe ser de forma objetiva para que no exista alguna orientación hacia la elección de cierto resultado. En este trabajo para llevar a cabo la evaluación se tomarán en cuenta criterios en un contexto técnico, ambiental y económico.
4. Selección de la herramienta para la toma de decisión. Existen diversas herramientas para resolver un problema de decisión.
5. Definición de la escala de ponderación de los criterios: Consiste en determinar el sistema de ponderación y el peso de cada uno de ellos, de manera que indique si cumple o no cumple con lo que se pretende lograr.

2.6.1 Herramientas de toma de decisión.

Desde la década de los años cuarenta se han desarrollado métodos de decisión multicriterio, que se emplean en diversos ámbitos como la selección óptima para ubicar una planta, la selección de la mejor tecnología para un proceso, el análisis estratégico a nivel empresarial entre otros. En la actualidad existen diversos métodos para resolver un problema de decisión con múltiples criterios entre los cuales destacan el método ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) y los de la familia PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluation).

La evaluación que se llevó a cabo en este trabajo fue mediante el método PROMETHEE, el cual se describe a continuación.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

Este método consiste en la construcción de una estructura de preferencia basada en comparaciones por pareja. Siendo a y b alternativas que pertenecen al conjunto A y P_j y w_j las funciones de preferencia y los pesos asignados respectivamente.

$$\begin{cases} \pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)w_j \\ \pi(b, a) = \sum_{j=1}^k P_j(b, a)w_j \end{cases}$$

Π (Φ) (a, b) expresa el nivel en que a es preferido sobre b para todos los criterios y viceversa. Cuando π (a, b) es próximo a 0, representa una preferencia global débil de a sobre b, mientras que π (a,b) cercano a 1 implica una preferencia fuerte de a sobre b.

Este método está diseñado en el software PROMETHEE ACADEMICA el cual evalúa las diferentes posibilidades con la información que se le cargue y jerarquizando las decisiones basado en las preferencias del tomador de decisiones. Este programa contiene dos tipos de rankings, el primero PROMETHEE I, sirve para obtener una calificación parcial de las tecnologías a comparar, en este caso se toma en cuenta la incomparabilidad de las alternativas y se basa en la comparación del flujo de salida ϕ^+ y el flujo de entrada ϕ^- (Pérez Valle, 2014) .

Φ^+ (ϕ^+), es un parámetro que señala los atributos positivos de las alternativas, mientras más grande sea Φ^+ mejor será la alternativa en cuestión.

Φ^- (ϕ^-), es un parámetro que indica los atributos negativos de las alternativas, mientras mayor sea Φ^- , será la alternativa menos indicada para cubrir los aspectos evaluados.

El segundo tipo de ranking es PROMETHEE II, el cual toma en cuenta el valor de flujos netos de información, realizando una jerarquización completa mediante la diferenciación de los flujos más y menos dominantes, por lo que se basa en la



**Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.**

comparación de Phi, que es el indicador global de cuál es la mejor alternativa a desarrollar.

Visual Promethee es una herramienta del programa que ayuda al evaluador a identificar la mejor decisión posible gráficamente, justificar o invalidar decisiones basadas en elementos objetivos y evaluar las alternativas en base a múltiples criterios.

2.7 ESTIMACIÓN DE COSTOS

El costo se puede entender como la suma de las erogaciones en la que incurre una persona o industria para adquirir un bien o servicio, con la finalidad de generar un ingreso en el futuro.

Los costos son importantes para la toma de decisiones, planes, políticas y definición de estrategias, los costos se pueden clasificar de diferentes maneras como se muestra en la Figura 26.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

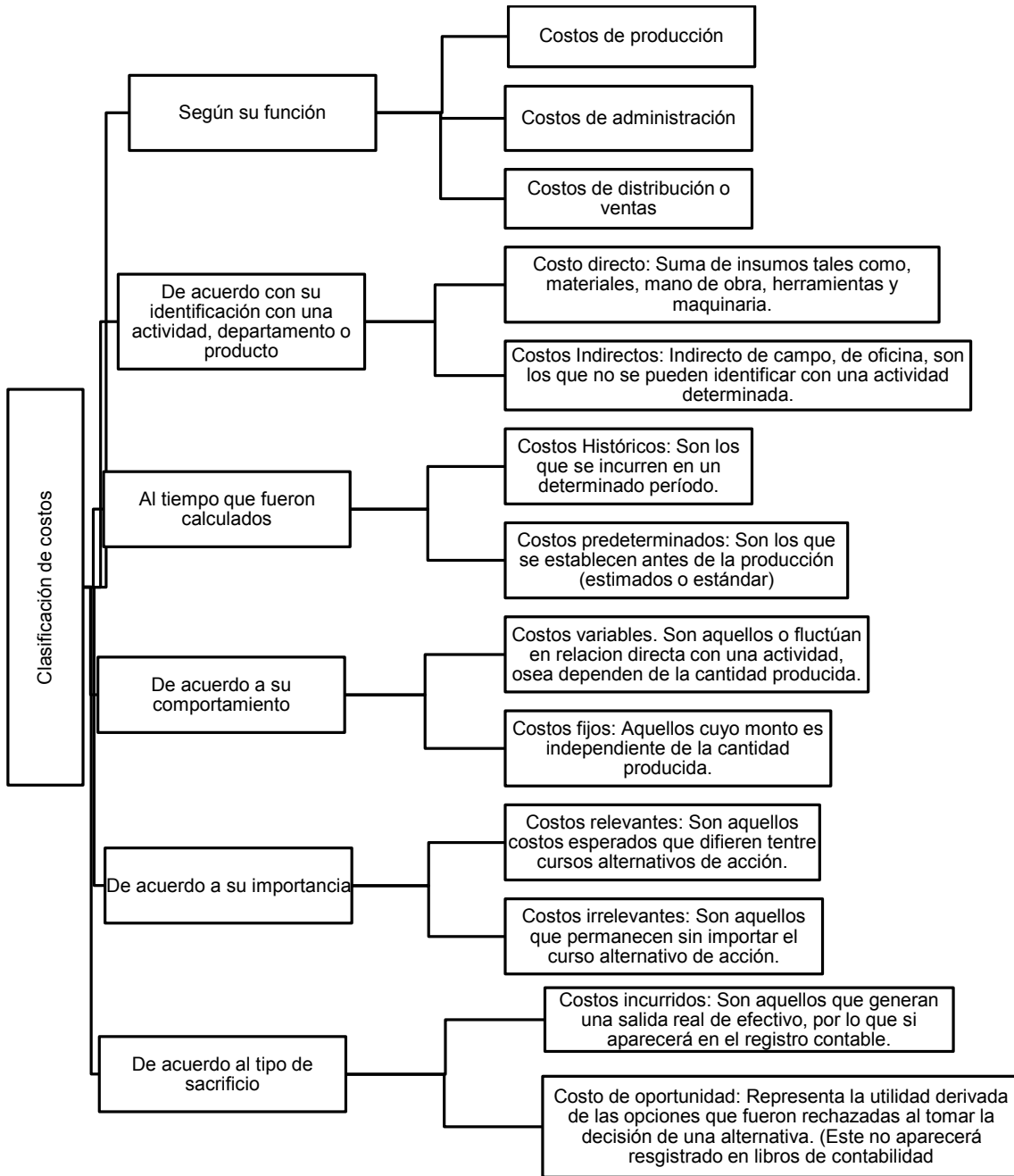


Figura 26 Clasificación de costos



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

La magnitud de la estimación de los costos, depende de la cantidad y calidad de la información que se tenga, la experiencia del estimador, el tiempo y los recursos disponibles.

Existen diferentes clasificaciones de estimado de costos, las cuales se muestran a continuación en la Tabla 16.

Tabla 16 Diversas Clasificaciones de estimados de costos (Apuntes de Ingeniería de Proyectos).

Clasificación estándar AACE	Estándar ANSI	Asociación de Ingenieros de Costos (UK)	ASPEN TECH	Lineamientos PEMEX
Clase 5 Bajo: -20 a -50% Alto: +30 a +100%	Estimado Orden de magnitud -30%/+50%	Orden de Magnitud Clase IV -30%/+30%	Estimado Orden de Magnitud -30%/+50%	Clase V -30%/+50%
Clase 4 Bajo: -15 a -30% Alto: +20 a +50%	Estimado Presupuesto -15%/+30%	Estimado de Estudio Clase III -20%/+20%	Estimado Preliminar -25%/+35%	Clase IV -20%/+35%
Clase 3 Bajo: -10 a -20% Alto: +10 a +30%		Estimado Presupuesto Clase II - 10%/+10%	Estimado Presupuesto -20%/20%	Clase III -15%/+25%
Clase 2 Bajo: -05 a -15% Alto: +05 a +20%	Estimado Definitivo -5%/+15%	Estimado Definitivo Clase I -5%/+5%	Estimado de Control -10%/+10%	Clase II -10%/+15%
Clase 1 Bajo: -3 a -10% Alto: +3 a +15%			Estimado Definitivo -0%/+10%	Clase I -5%/+10%

De acuerdo con la clasificación estándar AACE, el propósito y la metodología usada para cada clase se enmarcan en la Tabla 17.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

Tabla 17 Matriz de Estimación de Costos (Presentación estimado de costos, equipo de trabajo de Ingeniería Ambiental y AACE International (Asociation for the Advancement of Cost Engineering International)).

Clase	Propósito	Metodología Utilizada
5 (Orden de magnitud)	Planeación estratégica de proyectos de capital en el largo plazo, estudios iniciales de viabilidad, análisis de alternativas.	Modelos de orden de magnitud basado en proyectos similares, índices y curvas costo/capacidad, modelos paramétricos (Lang)
4 (Estudio)	Planeación estratégica detallada, estudios de factibilidad, aprobación preliminar de presupuesto.	Modelos que utilizan índices o curvas para costear equipos principales y modelos paramétricos (Hand)
3 (Preliminar)	Autorización de presupuesto.	Costos unitarios semi-detallados por línea de producción, uso de índices para componentes menores (Guthrie)
2 (Definitivo)	Control de presupuesto detallado.	Costos unitarios conocidos y detallados basados en el diseño de la ingeniería.
1 (Detallado)	Control de presupuesto detallado y definitivo, revisión de estimaciones contra terminación.	Costos unitarios detallados y estimados por contratistas (cotizaciones), basados en la terminación de planos y especificaciones.

Los estimados de costos llevan un orden cronológico y es necesario conocer lo que requiere cada uno de estos estimados para poder desarrollarlos, en este trabajo sólo se hablará del Estimado preliminar o estimado nivel 3.

La estimación preliminar se realiza en un tiempo relativo de 15 a 45 días, se parte del costo del equipo mayor, el cual es estimado en base a datos técnicos de los equipos, proporcionados por las especialidades involucradas en el proyecto. Los costos de otros conceptos de la inversión tales como materiales, fletes, partes de



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

repuesto, construcción, Ingeniería, se estimarán como un porcentaje del costo del equipo mayor. Este tipo de estimado se realiza después de la selección del proceso y diseño Conceptual. Para realizar este tipo de estimado es necesario contar con diagrama de flujo de proceso (DFP), balance de materia y energía, servicios generales, lista de equipo, bases de datos e información de costos confiables (Madrid Meneses, 2011).

El método Guthrie, es el que se usó para realizar el estimado de costos preliminar. Este método fue desarrollado en 1986 y fue desarrollado a partir de los siguientes elementos de costo (ver Tabla 18). En la segunda columna de la tabla se encuentra el factor por el que debe ser multiplicado el costo del equipo total que representa el 100% para conocer los costos directos e indirectos de la inversión.

Tabla 18 Elementos de costos del método Guthrie.

Rubros de estimados	Factor
Costo directo (DC)	DC=E+M+L
Equipo	E
Material Auxiliar	M
Tubería	0.32
Concreto	0.089
Acero	0.017
Instrumentos	0.073
Eléctrico	0.083
Aislamiento	0.034
Pintura	0.006
Trabajo de Campo (Construcción, ajuste de equipo)	0.58
Costos indirectos (CI)	
Fletes, seguros e ingeniería	1.3*DC
Contingencia y honorarios	0.18
Inversión total	CD+CI



3 EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE LIMPIEZA Y MEJORAMIENTO DEL BIOGÁS

La metodología presente tiene como finalidad elegir una tecnología de mejoramiento de biogás y un proceso de remoción de H_2S mediante un análisis multicriterio ya que de esta manera se pretende facilitar la toma de decisiones y elegir de manera objetiva la mejor opción. A continuación (ver Figura 27) se enuncias los pasos necesarios para la toma de decisión de ambos casos.

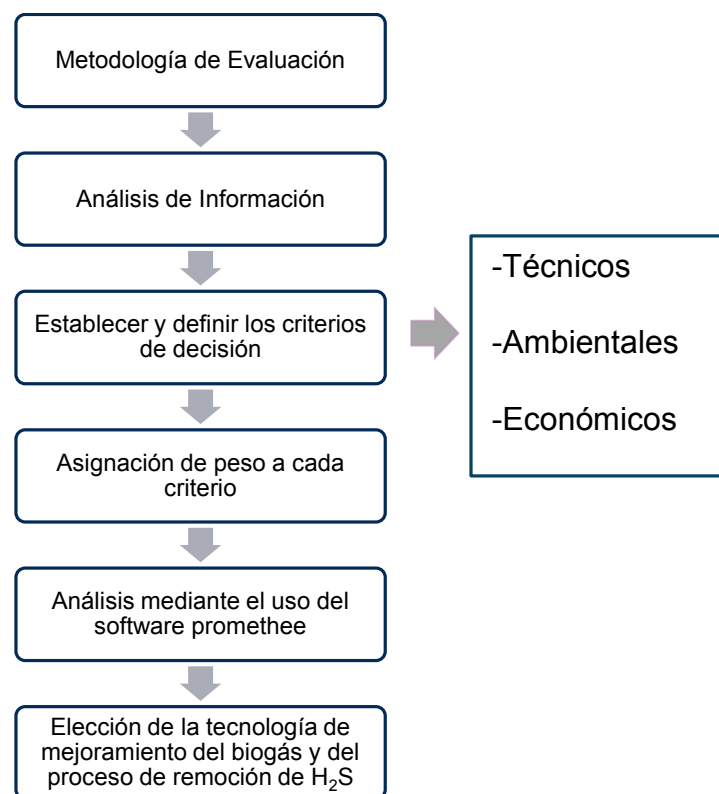


Figura 27 Metodología de evaluación de tecnologías para el mejoramiento de biogás y para los procesos de remoción de H_2S (Paris, 2014).



3.1 EVALUACIÓN AMBIENTAL, TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LAS TECNOLOGÍAS DE MEJORAMIENTO DEL BIOGÁS.

3.1.1 Definición de los criterios de evaluación.

Para contrastar cada tecnología se tomaron en cuenta ciertos criterios técnicos, ambientales y económicos que se describen a continuación.

3.1.1.1 Criterios técnicos.

Diferentes criterios han sido analizados mediante la información recabada de las distintas tecnologías de mejoramiento del biogás, con la finalidad de comparar las características principales de las tecnologías se han tomado los cinco casos más representativos y de los cuales se tiene información para la evaluación de las tecnologías.

Consumo de Energía eléctrica.

Los procesos de digestión anaerobia trabajan mediante energía eléctrica por lo cual es necesario conocer el gasto de energía que requiere esta sección del proceso. El consumo de energía eléctrica se refiere a la cantidad de energía eléctrica medido en kW-h para tratar un metro cúbico normal de biogás.

Consumo de agua.

Para procesos de remoción de contaminantes contenidos en los gases se requiere el uso del agua, pero su abastecimiento constituye costos adicionales así como suministro del mismo. El consumo de agua se refiere a la cantidad de agua necesaria para tratar una cantidad específica del biogás.

Consumo de reactivos.

El empleo de sustancias adicionales, implica un consumo constante de las mismas añadiendo complejidad y costo al proceso, es por ello que es deseable tener el mínimo de consumo de reactivos, de menor complejidad y precio. En este caso se hará un análisis cualitativo, debido a la calidad de información que tenemos en este



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

momento. Para esta evaluación se toma en cuenta el tipo de reactivo y la cantidad a usar.

Flujo de biogás mejorado.

El propósito de las tecnologías de mejoramiento del biogás, es obtener una corriente con alto contenido de metano, por lo que es fundamental conocer el flujo de biogás mejorado (biometano), además de que indica el rendimiento del sistema de mejora del biogás.

Número de equipos en función del área.

El número de equipos y el área que ocupan, se puede tomar como un parámetro para comparar la complejidad y facilidad de instalación de los diferentes sistemas de mejoramiento de biogás.

Experiencia en el mercado.

Es fundamental que al implementar un proceso nuevo para un fin en particular, éste haya sido probado con anterioridad. En este caso no se evaluará el proveedor de la tecnología y la experiencia que tiene en la instalación y funcionamiento de las plantas, si no la experiencia que tiene cada tecnología en el mercado. El objetivo de este criterio es evaluar básicamente la experiencia de cada tecnología en un intervalo de los últimos 5 años. Se estableció este intervalo de tiempo porque el uso de este tipo de tecnologías es prácticamente nuevo y ha cambiado su preferencia a nivel mundial. La experiencia se medirá como la razón del número de plantas instaladas durante los últimos cinco años.

En la Tabla 19 se enlistan los valores cuantitativos y cualitativos utilizados para la evaluación técnica para cada una de las tecnologías de mejoramiento del biogás.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

Tabla 19 Evaluación de los criterios técnicos.

Tecnología	Consumo de Energía Eléctrica (kWh/m ³)	Consumo de Agua (L/h)	Consumo de reactivos (Cualitativo)	Flujo de biogás mejorado (Nm ³ /h)	Número de equipos por unidad de área (eq/m ²)	Experiencia en el mercado (Número de plantas/año de arranque)
PSA	0.16	00.00	Bajo	211.48	0.54	8.80
Absorción con agua	0.30	89.30	Medio	196.00	0.11	19.0
Absorción con aminas	0.12	10.70	Muy Alto	200.00	0.18	16.4
Separación por membranas	0.25	0.00	Alto	207	0.29	6.60

3.1.1.2 Criterios Ambientales.

Los criterios que se tomarán en cuenta para esta sección se basan en las emisiones de contaminantes en el agua y aire que pueden generar los sistemas de mejoramiento de biogás.

Emisión de sulfuro de hidrógeno (H₂S) a la atmósfera.

El H₂S es el principal componente a remover de la corriente de biogás, por lo que se busca la manera de que el sistema de mejoramiento de biogás que se elija genere la mínima emisión de H₂S.

Emisión de gases de efecto invernadero.

En los sistemas de mejoramiento de biogás generalmente hay fuga de CH₄ a la atmósfera, además de una corriente de CO₂. Para evaluar como si fuera un solo parámetro se ha calculado el equivalente en CO₂ de la corriente de gas metano que escapa a la atmósfera.



Tratamiento de aguas de desecho.

Todos los procesos de mejoramiento de biogás generan condensados con trazas de sulfuro de hidrógeno, se evaluó de manera cualitativa el tipo de tratamiento que cada tecnología requiere ya sea un tratamiento continuo de agua, semi-continuo o batch, siendo el continuo un tratamiento muy alto y batch como un tratamiento menos intensivo (bajo).

En la Tabla 20 se condensan los valores de cada criterio para las diferentes tecnologías de mejoramiento del biogás.

Tabla 20 Evaluación de los criterios Ambientales

Tecnología	Emisión de gases de efecto invernadero (ton/h).	Emisión de sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) a la atmósfera (Nm/h).	Tratamiento de aguas (Cualitativo)
PSA	0.06	0.00	Bajo
Absorción con agua	0.32	0.94	Muy alto
Absorción con agua	0.15	0.12	Alto
Separación por membranas	0.21	0.00	Medio

3.1.1.3 Criterios Económicos

Costo de Inversión.

Se refiere al costo de los equipos para el proceso de mejoramiento del biogás.

Costo de operación y Mantenimiento.

Son los costos en que incurre un sistema para su funcionamiento durante su vida útil o la vida del proyecto, así mismo se incluyen los costos necesarios para su mantenimiento (UNAM, y otros). Los costos que se presentan se evaluaron para un proyecto de 20 años, ya que los proyectos de inversión pública sobre residuos sólidos urbanos, deberán estar diseñados para una vida útil de al menos 15 años (SEMARNAT, 2014).



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

En la Tabla 21, se conjuntan los criterios económicos a evaluar para las tecnologías de mejoramiento del biogás.

Tabla 21 Evaluación de criterios económicos

Tecnología	Inversión (USD)	Operación y mantenimiento (USD/año)
PSA	\$1,193,167.80	\$58,650.49
Absorción con agua	\$1,700,000.00	\$69,190.00
Absorción con aminas	\$1,746,020.46	\$65,472.38
Separación por membranas	\$1,225,686.00	\$68,939.50

3.1.2 Definición de la escala de evaluación

Se determinaron los criterios a evaluar y asignaron pesos a cada criterio para establecer la escala de evaluación que se presenta en la Tabla 22.

Tabla 22 Escala de evaluación, ponderación de los criterios y sub-criterios a evaluar.

Escala de Evaluación		
Criterio	Subcriterio	Ponderación (%)
Técnicos	Consumo de energía eléctrica	6.96
	Consumo de reactivos	8.12
	Consumo de agua	5.03
	Flujo de biogás mejorado	10.44
	Número de equipos en función del área	5.03
	Experiencia en el mercado	3.09
Subtotal		48.67
Ambiental	Emisión de gases de efecto invernadero	5.59
	Emisión de H ₂ S a la atmósfera	7.18
	Tratamiento de aguas de desecho	9.90
Subtotal		22.67
Económico	Costo de inversión	17.79
	Costo de operación y mantenimiento	20.88
Subtotal		38.67
Total		100



3.1.3 Resultados.

A continuación se muestran los resultados de la evaluación multicriterio que se realizó mediante el software Promethee Academic en un escenario donde se analizan todas las tecnologías de mejoramiento de biogás ordenadas de la mejor a la peor como se puede observar en la Tabla 23.

Tabla 23 Resultados de evaluación de criterios

Tecnología	Phi	Phi+	Phi-
PSA	0,4017	0.4273	0.0256
Membranas	0.1888	0.3123	0.1235
Absorción con agua	-0.2239	0.1553	0.3792
Absorción con aminas	-0.3667	0.0948	0.4615

En el escenario propuesto la tecnología con mejor calificación (Phi) es adsorción por cambio de presión (PSA) de 0.4017 y la peor con -0.3667 es la absorción con aminas.

En la Figura 28 se muestra gráficamente la relación entre los aspectos positivos (Phi+) columna izquierda y negativos Phi (-) columna derecha de las tecnologías evaluadas. Mientras la intersección se más alta en ambas columnas, en este caso para la alternativa de adsorción por cambio de presión significa que es la alternativa de preferencia ya que como se observa en la columna izquierda es la que está más próxima al número 1 por tal motivo tiene más aspectos positivos es decir cumple con mayores requerimientos para el proceso de mejoramiento de biogás y del lado derecho es más cercano al número 0 lo que significa que es la alternativa que tiene menores aspectos negativos respecto a las demás.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

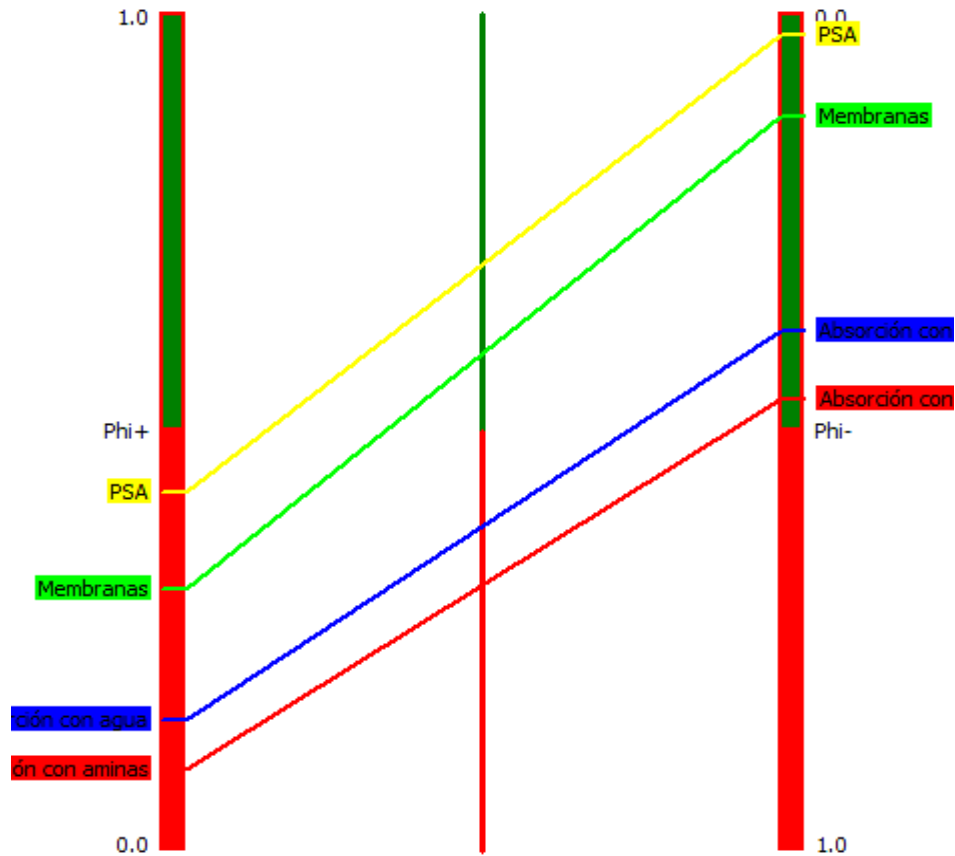


Figura 28 Clasificación gráfica de las tecnologías de mejoramiento del biogás. Elaborado mediante el Software Visual Promethee I.

En la Figura 29, se pueden observar las diferencias entre las tecnologías de manera global, este resultado se obtuvo mediante el método promethee II, el cual realiza un balance global sumando los aspectos positivos y negativos. De esta manera se asegura que el resultado sea correcto, siendo la alternativa con mayores ventajas la tecnología de adsorción por cambio de presión con un valor de phi de 0.4017, ya que remueve una cantidad mayor de contaminantes con costos de inversión y operación bajos y un impacto ambiental menor en comparación de las otras tecnologías.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

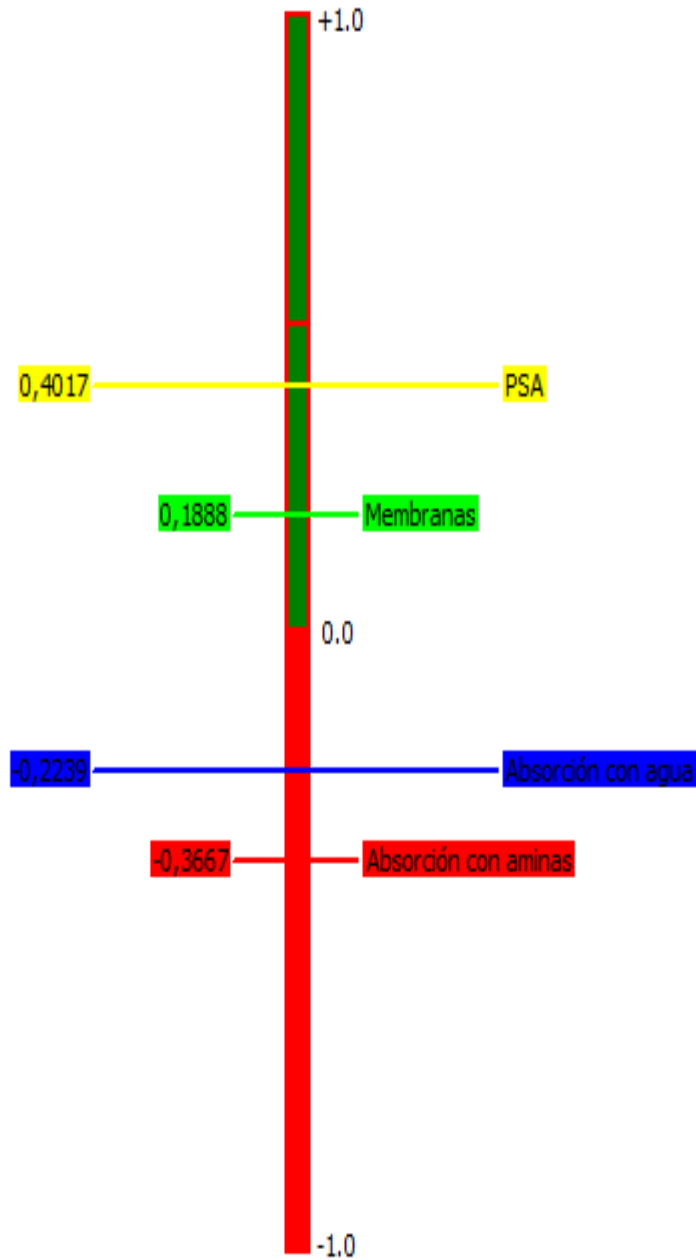


Figura 29 Clasificación gráfica de las tecnologías de mejoramiento del biogás Elaborado mediante el Software Visual Promethee II. Evaluación Ambiental, económica y técnica para el proceso de remoción de H₂S



3.2 EVALUACIÓN AMBIENTAL, TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LAS TECNOLOGÍAS DE LIMPIEZA DEL BIOGÁS.

Como se mencionó en el capítulo tres, se requiere remover 1000 ppm de H_2S para el uso del biogás en los moto generadores, para este proceso existen diversas tecnologías, por lo cual se debe realizar una selección y determinar cuál es la más adecuada para el proceso propuesto. A continuación se describen los criterios que se tomaron en cuenta para una elección adecuada.

3.2.1 Definición de los criterios de evaluación.

Para contrastar cada tecnología de remoción de H_2S se tomaron en cuenta ciertos criterios técnicos, ambientales y económicos que se describen a continuación. En esta sección no se van a considerar las tecnologías que remueven el H_2S dentro del digestor ya que éstas afectan la digestión anaerobia. Las tres tecnologías que se evaluarán son la adsorción con hierro esponja, la adsorción con carbón activado y la remoción de H_2S con biofiltro y carbón activado.

3.2.1.1 Criterios Técnicos.

Para los criterios se tomaron en cuenta tres parámetros, que son con los que se cuenta con mayor información.

Consumo de reactivos.

El empleo de sustancias implica un consumo constante de las mismas añadiendo complejidad y costo al proceso, es por ello que es deseable tener el mínimo de consumo de reactivos, de menor complejidad y precio.

Consumo de agua.

Para procesos de remoción de contaminantes contenidos en los gases se requiere el uso del agua, pero su abastecimiento constituye costos adicionales así como suministro del mismo. El consumo de agua se evaluará de manera cualitativa.



Complejidad de Operación.

Este criterio se puede tomar como un parámetro para comparar la complejidad mediante la facilidad de operar cada equipo y el tiempo de residencia requerido para cada proceso.

La regeneración del adsorbente hierro esponja puede resultar peligroso por la ignición de la viruta y esto vuelve complejo operarlo. La adsorción de H_2S mediante carbón activado purifica rápidamente el biogás pero requiere una regeneración constante de este material. Para la remoción del biofiltro se requiere un tratamiento adicional con carbón activado, pero el tiempo de residencia es un poco más alto que en el carbón activado y requiere menor cantidad de carbón activado. Este criterio se evaluará cualitativamente como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24 Escala cualitativa para evaluar la complejidad operativa

Escala	Tiempo de residencia	Tipo de regeneración
Bajo	Grande	Sencilla
Medio	Medio	Constante
Alto	Pequeño	Peligrosa

3.2.1.2 Criterio Ambiental

En esta sección sólo se considera un criterio ambiental, que es la generación de residuos a disposición final. Todos los residuos al contener sulfuro se vuelven de residuos peligrosos de acuerdo con (NOM-052-SEMARNAT-2005). Lo que se pretende determinar el proceso que genere la menor cantidad de residuos a disposición.



3.2.1.3 Criterios Económicos

Los costos de inversión y operación son variables importantes a considerar para la selección adecuada para los procesos de remoción de H₂S.

Costo de Inversión.

Se refiere al gasto inicial para adquirir los equipos (incluyendo bombas, recipientes, sistema de inyección).

Costo de operación.

Es el costo en el que se incurre al sistema adquirido proyectando este gasto a 20 años como se mencionó en la sección 3.1.1.3 del presente trabajo.

En la Tabla 25, se conjuntan los criterios técnicos, ambientales y económicos a evaluar para cada proceso.

Tabla 25 Matriz multicriterio para la evaluación de las tecnologías de remoción de sulfuro de hidrógeno.

Matriz Multicriterio					
Criterios	Subcriterios	Unidades	Hierro Esponja	Filtro biológico+ Carbón activado	Adsorción por carbón activado
Técnicos	Consumo de reactivos	kg / año	7,435,446.41	4,095.00	7,945.97
	Consumo de agua	L/h	Bajo	Alto	Medio
	Complejidad de operación		Alto	Medio	Bajo
Ambientales	Generación de Residuos a disposición final		Alto	Bajo	Medio
Económicos	Costo de Operación	\$USD	\$935,888.77	\$10,748.79	\$17,164.87
	Costo de Inversión	\$USD	\$ 390,000.00	\$ 206,115.36	\$ 343,942.50



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

3.2.2 Definición de la escala de evaluación

Se estableció la siguiente escala de evaluación, conforme al conocimiento e información de los métodos a evaluar.

Escala de Evaluación		
Criterios	Subcriterios	Ponderación
	Consumo de reactivos	15.00
	Consumo de agua	15.00
	Complejidad	5.00
Subtotal		35.00
Ambientales	Generación de Residuos a disposición final	15.00
Subtotal		15.00
Económicos	Costo de Inversión	15.00
	Costo de operación	35.00
Subtotal		50.00
Total		100.00

3.2.3 Resultados.

A continuación se muestran los resultados de la evaluación multicriterio en la cual se analizan los tres procesos para remover H_2S . Esta evaluación se hizo de manera similar que en el apartado 3.1 en el cual se menciona que se realiza la evaluación mediante el uso el software Promethee.

Una vez realizado el análisis, se puede observar en la siguiente tabla los resultados de todos los parámetros (atributos positivos y negativos) de todas las tecnologías evaluadas.

Tecnología	Phi	Phi+	Phi-
Biofiltro+CA	0.4097	0.6597	0.2250
Carbón Activado	0.2372	0.5725	0.3353
Hierro Esponja	-0.6469	0.1667	0.8136



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

La tecnología con mejor calificación es el biofiltro con carbón activado. En la Figura 30 se muestra gráficamente la relación entre los aspectos positivos (Phi+) y negativos (Phi-) de las tecnologías evaluadas.

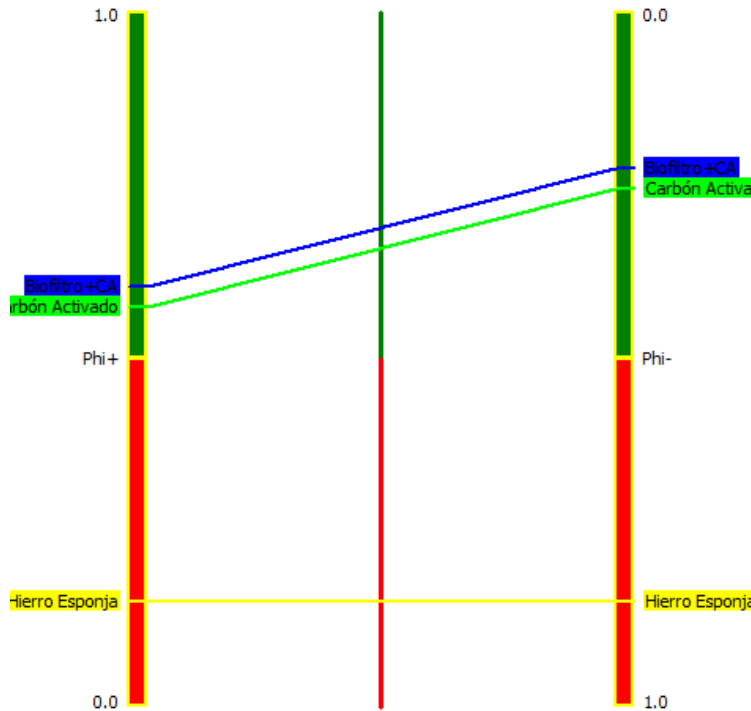


Figura 30 Clasificación gráfica de las tecnologías de Remoción de H₂S, usando la aplicación promethee I.

Como se mencionaba en el sub-capítulo anterior la columna de lado izquierdo de la figura representa los aspectos positivos del método de remoción de H₂S, por lo que el Biofiltro+CA es la mejor alternativa ya que cumple con la mayoría de los criterios a evaluados, del lado derecho de la figura se representa por medio de una columna los aspectos negativos de cada alternativa, entre más abajo esté la intersección el método evaluado no cumple con los criterios necesarios para elegir este método. En el caso de la columna derecha entre más cerca esté del 0 significa que tiene menores criterios negativos evaluados.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

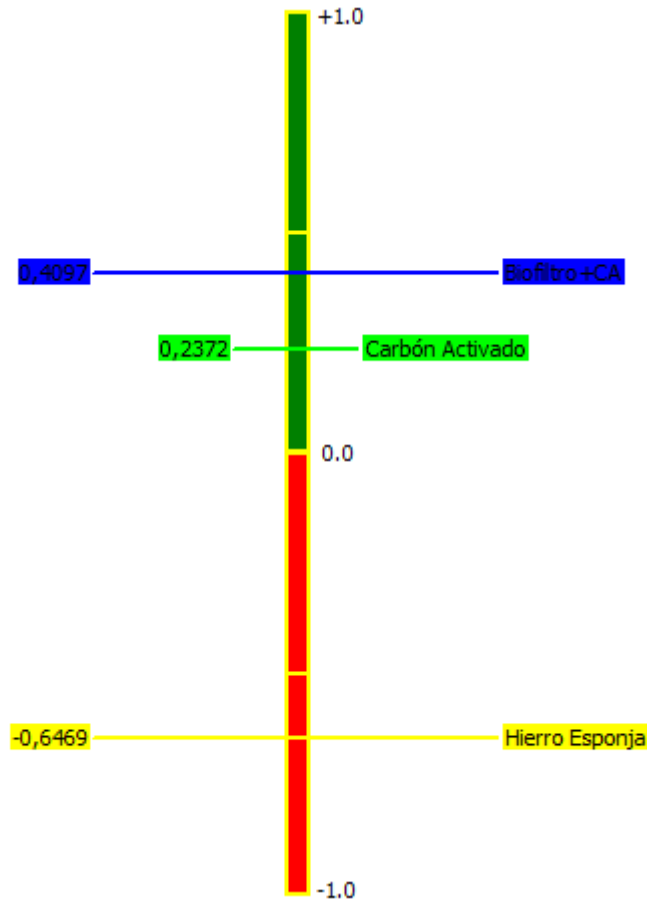


Figura 31 Clasificación gráfica de las tecnologías de Remoción de H₂S, usando Promethee II.

Mediante el método promethee II se obtuvo un resultado global que se puede observar en la Figura 31, en donde se observa que la tecnología con mayor calificación es el Biofiltro+CA con un valor de 0.4097 ya que remueve de mejor manera el H₂S con costos de inversión y operación bajos. Sin embargo la tecnología con menor calificación es el Hierro esponja con un valor de -0.6469, lo que significa que no cumple con los criterios que se evaluaron para la selección de alternativas.



4 CASO DE ESTUDIO.

Capulhuac de Mirafuentes es un municipio que se encuentra en la parte central del Estado de México a una altura promedio de 2800 metros sobre el nivel del mar en las coordenadas geográficas 19° 12' latitud norte y 99° 28' latitud oeste (Sánchez, 1997). Este municipio cuenta con un centro de recolección de residuos sólidos municipales. Se escogió este lugar como una propuesta del Gobierno para desarrollar la ingeniería para el aprovechamiento de los RSOM.

En este municipio se recolectan 100 ton/día de residuos sólidos orgánicos municipales por lo cual será nuestra base de cálculo para el trabajo. El balance de materia de generación de biogás para la cantidad de RSOM se presenta en los anexos.

5 SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS

A continuación se presenta la descripción de cada alternativa de aprovechamiento biogás, como también la estimación de costos respectiva. Para el caso 1, se seleccionó el sistema de adsorción por cambio de presión que se puede usar con algunas modificaciones para usar el biogás como gas natural. En el caso 2 se propuso un proceso de remoción de agua, sulfuro de hidrógeno para aprovechar el biogás en un moto-generator y producir energía eléctrica, pero también se realizó una proyección utilizando la tecnología de adsorción por cambio de presión ya que con esta se puede aprovechar el biogás para producir energía eléctrica.



5.1 CASO 1. SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS PARA SU INYECCIÓN A LA RED DE GAS NATURAL.

Para aprovechar el biogás como gas natural, se realizó una evaluación de tecnologías para mejorar el biogás (ver 3.1) en la cual se seleccionó la tecnología de adsorción por cambio de presión (PSA).

El proceso de mejoramiento consiste en enviar el biogás (corriente 1) a un gasómetro para equilibrar las fluctuaciones de la producción del biogás. La corriente 2 se envía al equipo de mejoramiento de biogás, que consiste en una unidad de carbón activado para la remoción del sulfuro de hidrógeno del biogás, la corriente desulfurada se envía a un enfriador para condensar el agua contenida en el biogás. Después el gas seco entra al sistema PSA, que consiste en seis adsorbedores que trabajan alternadamente. La corriente de gas entra a presión al primer adsorbedor, donde el CO_2 se adsorbe mediante una cama llena de tamices moleculares de carbono (CMS por su nombre en inglés carbón molecular sieve), cuando se satura el adsorbente el proceso en el primer adsorbedor se detiene y continúa el proceso de remoción de CO_2 en el siguiente adsorbedor y así sucesivamente, hasta obtener una composición de 96.7% volumen de metano en el gas (corriente 4). Mientras el proceso de adsorción continúa, el CO_2 se retira del material del primer equipo mediante una bomba de vacío disminuyendo así la presión, el gas que se desprende es el gas residual que será emitido a la atmósfera (corriente 3).

Para cumplir con la NOM-001-SECRE-2010, al biometano obtenido como se describió anteriormente se debe añadir una corriente de etano, como se puede apreciar en la Figura 32.

Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

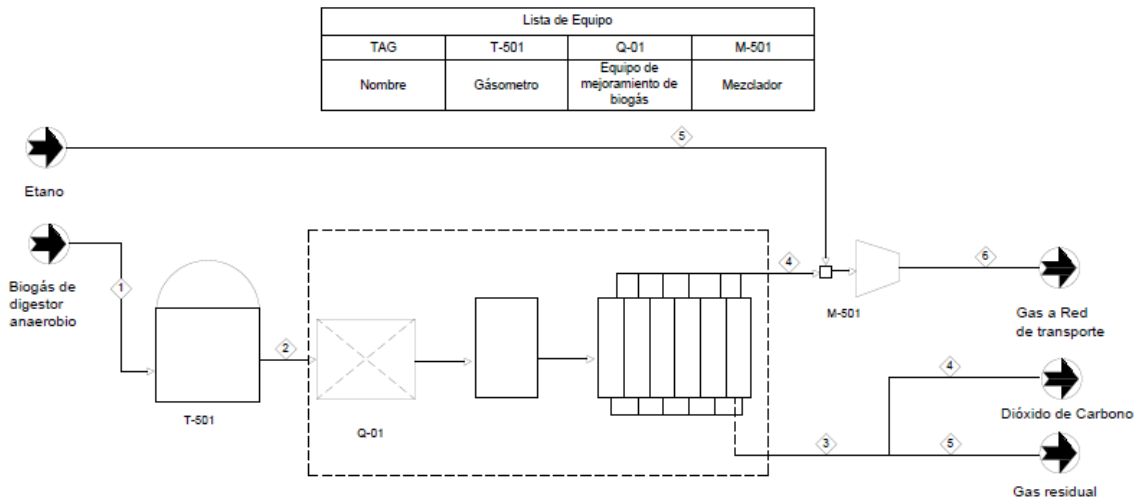


Figura 32 Diagrama de flujo del proceso de mejoramiento del biogás.

En este proceso además de obtener el producto principal que es el biometano, también se obtiene una corriente de CO₂ con alto grado de pureza, el cual se puede vender en la industria alimenticia, como por ejemplo para el proceso de embotellado de las refresqueras.

La descripción de los equipos de proceso se muestra en Tabla 26. El equipo Q-01 corresponde a la tecnología PSA, se muestra como equipo paquete ya que por condiciones de privacidad no se puede explicar a detalle todos los equipos pertenecientes a la tecnología.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

Tabla 26 Lista de equipo para el proceso de mejoramiento de biogás.

Lista de Equipo						
TAG	Nombre	Modelo	Descripción	Unidades	Material	Dimensiones
T-501	Gasómetro	SATTLER DMGS TM	Almacena y equilibra las fluctuaciones de la producción del biogás	1	Polímero/ Acero	a: 9m v: 1370 m3
Q-01	Tecnología de mejoramiento de biogás PSA.	ETW BMA 360	Remueve contaminantes del biogás (H ₂ S, H ₂ O y CO ₂). Incluye Filtro, Trampa de Condensados, Enfriadores, compresores, válvulas y bombas.	1	Diversos	a:2.438 m L: 12.192 m
C-501	Compresor	N/D	Aumenta la presión para cumplir con los requerimientos de las condiciones generales para la adición del gas a la red de transporte	1	Hierro fundido	N/D



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

5.1.1 Estimación de Costos

Para estimar el costo de inversión del sistema de mejoramiento de biogás se realizó mediante el método Guthrie descrito en el apartado 2.7 del presente trabajo. En la Tabla 27 se desglosan los costos para el sistema del caso 1.

Tabla 27 Inversión total del sistema de mejoramiento del biogás.

Rubros de estimados	Factor	Costo (USD)
Costo directo (CD)		\$ 3,438,286.21
Equipo		\$ 1,561,437.88
Material Auxiliar		\$ 971,214.36
Tubería	0.32	\$ 499,660.12
Concreto	0.089	\$ 138,967.97
Acero	0.017	\$ 26,544.44
Instrumentos	0.073	\$ 113,984.97
Eléctrico	0.083	\$ 129,599.34
Aislamiento	0.034	\$ 53,088.89
Pintura	0.006	\$ 9,368.63
Trabajo de Campo (Construcción, ajuste de equipo)	0.58	\$ 905,633.97
Costos indirectos		\$ 4,750,830.89
Fletes, seguros e ingeniería	1.3*CD	\$ 4,469,772.07
Contingencia y honorarios	0.18	\$ 281,058.82
Inversión total		\$ 8,189,117.09



5.2 CASO 2. SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA

Como se menciona al principio de este capítulo hay dos vías para generar energía eléctrica a partir del biogás, el primero es sólo mediante la limpieza del biogás el segundo es mediante el mejoramiento de biogás que de acuerdo con lo que se ha descrito en el presente trabajo es removiendo el CO_2 , H_2O y H_2S .

5.3 OPCIÓN 1: GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA REMOCIÓN DE H_2O Y H_2S

El sistema de generación eléctrica consta de alimentar el biogás a un gasómetro, el cual tiene la función de equilibrar las fluctuaciones en la producción del biogás. El gasómetro debe estar diseñado para una producción de tres a cuatro horas, según proveedores y Wellinger et al. (2013). Después la corriente de biogás se envía a un enfriador en donde se condensa el agua contenida en el biogás a una temperatura de 5°C aproximadamente. El biogás seco se envía al tren de desulfuración que se seleccionó en el capítulo anterior y finalmente este biogás limpio se envía a dos moto-generadores, este proceso se puede apreciar gráficamente en la Figura 33.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

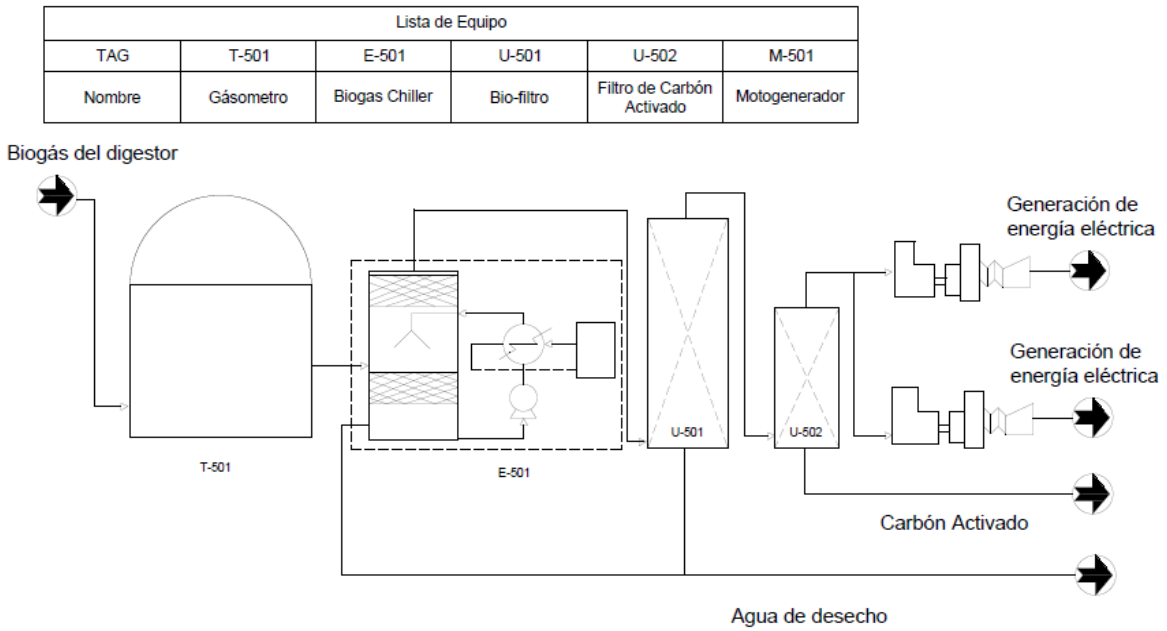


Figura 33 Diagrama de flujo de proceso para la limpieza del biogás para generar energía eléctrica (Elaboración propia).



5.3.1 Estimación de Costos

Para estimar el costo de inversión del sistema de mejoramiento de biogás se realizó mediante el método Guthrie descrito en el apartado 2.7 del presente trabajo. En la siguiente Tabla 28 se desglosan los costos para el sistema del caso 2.

Tabla 28 Inversión total del sistema de mejoramiento del biogás.

Rubros de estimados	Factor	Costo (USD)	
Costo directo (DC)		\$	8,965,854.15
Equipo		\$	4,071,686.72
Material Auxiliar		\$	2,532,589.14
Tubería	0.32	\$	1,302,939.75
Concreto	0.089	\$	362,380.12
Acero	0.017	\$	69,218.67
Instrumentos	0.073	\$	297,233.13
Eléctrico	0.083	\$	337,950.00
Aislamiento	0.034	\$	138,437.35
Pintura	0.006	\$	24,430.12
Trabajo de Campo (Construcción, ajuste de equipo)	0.58	\$	2,361,578.30
Costos indirectos		\$	12,388,514.00
Fletes, seguros e ingeniería	1.3*CD	\$	11,655,610.39
Contingencia y honorarios	0.18	\$	732,903.61
Inversión total		\$	21,354,368.15



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

5.4 OPCIÓN 2: GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA REMOCIÓN DE H₂O, H₂S Y CO₂.

Esta opción consiste en el uso de la misma tecnología que se seleccionó en el sub capítulo 5.1, pero incluyendo dos motogeneradores y sin la adición de la corriente de etano como se muestra Figura 34.

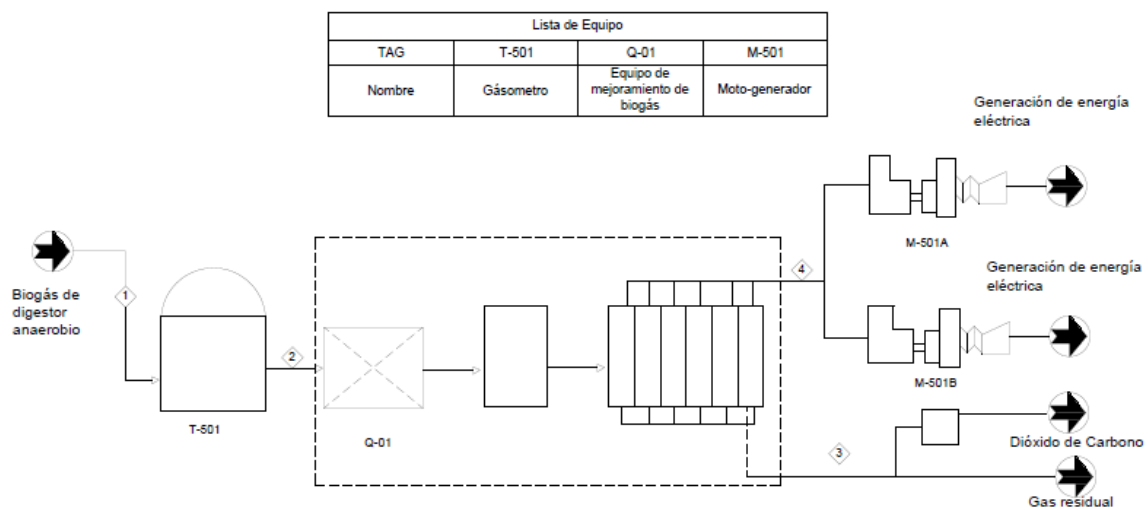


Figura 34 Diagrama de flujo de proceso para generar energía eléctrica a partir de biogás.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

5.4.1 Estimación de Costos

En la siguiente Tabla 29 se desglosan los costos para el sistema del caso 2 mediante el método Guthrie.

Tabla 29 Inversión total del sistema de mejoramiento del biogás.

Rubros de estimados	Factor	Costo (USD)
Costo directo (DC)		\$ 4,914,311.25
Equipo		\$ 2,231,748.98
Material Auxiliar		\$ 1,388,147.87
Tubería	0.32	\$ 714,159.67
Concreto	0.089	\$ 198,625.66
Acero	0.017	\$ 37,939.73
Instrumentos	0.073	\$ 162,917.68
Eléctrico	0.083	\$ 185,235.17
Aislamiento	0.034	\$ 75,879.47
Pintura	0.006	\$ 13,390.49
Trabajo de Campo (Construcción, ajuste de equipo)	0.58	\$ 1,294,414.41
Costos indirectos		\$ 6,790,319.45
Fletes, seguros e ingeniería	1.3*CD	\$ 6,388,604.63
Contingencia y honorarios	0.18	\$ 401,714.82
Inversión total		\$ 11,704,630.70



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

6 RESULTADOS.

A continuación en la Tabla 30 se pueden apreciar las variables a tomar en cuenta en cada sistema de aprovechamiento del biogás para determinar la alternativa más viable. Los parámetros son el contenido energético que obtendremos por cada metro cúbico de biogás mejorado y limpio, la emisión de gases contaminantes evaluados como toneladas equivalentes de CO₂, el costo de inversión expresados en pesos mexicanos, el costo de operación anual, el precio del producto principal que es el biometano y el precio del producto secundario que es dióxido de carbono con pureza superior al 98%.

Tabla 30 Cuadro de resultados.

Parámetro	Unidades	Caso 1 (Inyección a red)	Caso 2 (Generación de energía eléctrica)	
			Opción 1	Opción 2
Poder calorífico	MJ/m ³	38.46	18.10	34.64
Emisión de gases contaminantes	T eq. CO ₂ /h	0.06	0.38	0.06
Costo de inversión	MXN	113,800,065.71	296,750,977.01	162,653,400.53
Costo de operación	MXN/año	1,181,803.03 ⁸	271,372.78	1,059,547.54
Precio producto principal	MXN/MJ	0.06 ⁹	0.35	0.35
Precio producto Secundario	MXN/kg	3.00	N/A	3.00
Tasa social de descuento ¹⁰	%	10	10	10
Valor presente neto	MXN	- 30,342,262.63	- 200,238,048.71	9,567,705.37
Índice de Rentabilidad	VPN/VPI	-3.75	-0.48	18.00
Tasa interna de retorno	%	5.85	-2.44	10.85
Recuperación	Años	N/D	N/D	15.00

⁸ No se toma en cuenta el costo de transportación por los ductos de gas natural.

⁹ Es el precio del gas natural para su uso doméstico, este precio no incluye el de la distribución del gas natural.

¹⁰ (Secretaría de Hacienda y crédito público, 2013)



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

Como se aprecia en los resultados, el biogás para su uso como gas natural cumpliendo con las especificaciones para su incorporación a la red de gas natural, no es la mejor opción aunque presente una tasa interna de retorno positivo, el valor presente y el índice de retorno es negativo, esto significa que no se recuperará la inversión y tampoco representa ventajas económicas. Esto se debe a la depreciación que ha tenido los últimos dos años el gas natural, si el precio del gas natural llegará a incrementar un 75%, podría ser rentable esta alternativa, este precio se registró en el 2008 aunque para el 2015 sólo se espera un incremento del 15%.

La generación de energía resulta ser rentable pero mediante el proceso de la opción dos ya que se puede recuperar la inversión además que para el año 15 se pueden obtener beneficio. El proceso de mejoramiento de biogás remueve tres contaminantes del biogás obteniendo así un gas con mayor poder calorífico en comparación con la opción uno, es por lo que está opción resulta ser viable.

La opción uno no resulta ser rentable debido a su alto costo de inversión y los beneficios tan bajos que podría alcanzar. Además que en este proceso no se aprovechan todos los productos que se pueden obtener en comparación del caso dos. Además con este sistema de aprovechamiento de biogás, se generan mayores emisiones de gases efecto invernadero en comparación de los otros dos sistemas.



7 CONCLUSIONES

Se realizó una evaluación técnica, ambiental y económica de cuatro tecnologías para el proceso de mejoramiento del biogás concluyendo que la adsorción por cambio de presión (PSA) es la tecnología más viable para producir biometano con calidad de gas natural debido a su mejor calificación en los tres aspectos evaluados. Con los resultados obtenidos se propuso un diseño de las etapas principales del proceso de mejoramiento del biogás indicando los equipos principales y los productos que se pueden obtener.

Para generar energía eléctrica existen dos opciones para producirlo, la primera opción es por un proceso de remoción de sulfuro de hidrógeno y agua. Para esto se realizó una evaluación técnica, ambiental y económica de los procesos de remoción de sulfuro de hidrógeno con el que se determinó que tren de adsorción con carbón activado y un Biofiltro es la opción factible. La segunda opción fue recomendar el proceso de mejoramiento de biogás con el que se remueve sulfuro de hidrógeno, agua y dióxido de carbono generando un gas con mayor poder calorífico.

Para las todas las alternativas se realizó un estimado de costos nivel III mediante el método Guthier, con el cual se definieron las variables para la comparación económica entre ambos casos.

En conclusión la alternativa preferible para aprovechar el biogás es la producción de energía eléctrica, previo mejoramiento del mismo con el proceso de adsorción por cambio de presión.



8 REFERENCIAS

Abatzoglou, N and Boivin S. *A review of biogas processes, Biofuels.* Cánada : Bioprod Bioref, 2009.

Admson, A. *Química Física.* Barcelona, España : Reverté, S. A, 1979.

American Biogas Council. American Biogas Council. [Online] [Cited: Diciembre 18,2014].<http://www.americanbiogascouncil.org/biogasProcessing/activatedCarbon.html>.

Baur Fredric, et al. *Biogas Upgrading-Review of comercial technologies .* Schweden : Report Svenskt Gastekniskt Center AB, 2012.

Beil, M and Hoffstede , U. September 2010. *Guidelines for the implementation and operation of biogas upgrading systems .* UE : Project 019795, BIOGASMAX, EUROSPAN COMMISSION.

Elsevier [En línea] **Kapdi S. (India),** *Biogas Scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context.* 2003.

Campos, Elíax and Floats., *Procesos biológicos: La digestión anáerobia y el compostaje,* Días de Santos, 2012.

Coello, Diego Rodrigo *Bases Técnicas de Selección e Implementación de un sistema de Generación de Energía Eléctrica a partir del biogás. Tesis Profesional.* Ciudad de México : Facultad de Química, UNAM, 2014.

Costa Gomez, Claudius Da. *Biogas as an energy option: an overview. The biogas handbook,* Woodhead Publishing, IEA Bioenergy Alemania 2013.

Deublein, D.D., Steinhauser, A.S. *Biogas from waste and renewable resources, an indtroduction.* Alemania : Wiley-VCH, Verlag GmbH y Co.kGaA, 2008.



Drouillon, Magriet, Ryckebosch, Eline and Vervaeren, *Techniques for transformation of biogas to biomethane.* UE : El Sevier, 2008. Biogas and bioenergy 35.

Enriquez, H. *El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos.* s.l. Limusa, 2004.

Flores, Oscar. *Evaluación de rendimiento de par motor y potencia en motores de combustión interna de Volkswagen de México, Tesis Profesional.* Ciudad de México : Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM, 2010.

García, José. *Los aditivos para combustibles y sus efectos en los motores de combustión interna de ciclo Otto, Tesis Profesional.* Ciudad de México : Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM, 2010.

Huynh Q., et. al. Removal of hydrogen sulfide (H₂S) from biogas by adsorption method. [Online] [Cited: Octubre 17, 2014.]

J.Banks, Charles and Heaven, Sonia. Optimisation of biogas yields from anaerobic digestion by feedstock type. *The biogas handbook.* England : Woodhead Publishing, IEA, 2013.

Kaparaju, Prasad and Rintala, Jukka. Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP). *The biogas handbook.* s.l. : Woodhead Publishing, IEA, 2013.

Llaneza H., González A., González E. *Estudios de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás.* España : PSE Probiogas, 2010.

Madrid Meneses, Alejandro. *Estimación de costos para plantas de proceso tomando cómo base una planta de polietileno de baja densidad, Tesis de maestría.* Ciudad Universitaria, México : UNAM, Facultad de Química, 2011.

México, Estado de México. Municipios. [Online] [Cited: Enero 05, 2015.] <http://www.municipios.mx/mexico/>.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

Muñoz, M. and Moreno, F. *Motores alternativos de combustión interna*. España : Prensas Universitarias Zaragoza, 1999.

Murphy, Jerry D. and Thamisirroj, Thanasit. 2013. Fundamental science and engineering of the anaerobic digestion process for biogas production. *The biogas handbook*. Ireland : Woodhead Publishing, IEA, 2013.

Secretaría de Energía, NOM-001-SECRE-2010 *Especificaciones del Gas Natural*, Diario Oficial, México.

Secretaría del medio ambiente y recursos naturales, NOM-052-SEMARNAT-2005. *Norma que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos*, Diario Oficial México.

Ochoa, R. and Ortega, C. 2007. *Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario*. Ciudad de México : SAGARPA, 2007.

Petróleos mexicanos Gas y Petroquímica básica. [Online] Julio 13, 2012. <http://www.gas.pemex.com.mx/PGPB/Productos+y+servicios/Gas+natural/>.

Peréz Valle, Ever París *Propuesta de una metodología para la evaluación integral de proyectos industriales, mediante un análisis multicriterio*. Ciudad de México : Tesis profesional de Maestría. UNAM, 2014.

Person, T. IEA. [Online] 2014. www.iea-biogas.net/plant-list.html.

Persson Margareat, Jönsson Owe, Welling Arthur. 2006. *Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection Report task 37*. s.l. : IEA Bioenergy, 2006.

Peterson, T. IEA. *International Energy Agency*. [Online] 2014. [Cited: Diciembre 10, 2014.] web: www.iea-biogas.net/plant-list.html.

Petersson, Anneli. 2013. Biogas Cleaning. *The biogas handbook*. Switzerland : Woodhead Publishing, IEA, 2013.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

Román, M. *Funcionamiento de motores de combustión interna, Manual Universitario.* Nuevo León : Universidad Autónoma de Nuevo León, 1984.

Sánchez, Severo. [Online] [Cited: Enero 05, 2015.] <http://e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM15mexico/municipios/15019a.html>.

Scheper, T. 2003. *Advances in Biochemical Engineering.* Berlín, Germany : Springer-Verlag, 2003. Biotechnology, Volumen Biomethation II.

Scholz , Marco, Melin , Thomas and Wessling , Matthias. *Transforming biogas into biomethane using membrane technology.* Germany : Elsevier Ltd., 2012.

Secretaría de del medio ambiente y recursos naturales. *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México.* México 2012.

Secretaría de del medio ambiente y recursos naturales *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.* México : Diario Oficial, 2014.

Secretaría de del medio ambiente y recursos naturales. Líneamientos para el otorgamiento de apoyos de la SEMARNAT para proyectos de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial. México 2014.

Tasneem A., Tauseef S., Abbasi S. *Biogas Energy.* New York : Springer Briefs in Environmental Science, 2012.

Tchobanoglous, George, Theisen , Hilary and Vigil, Samuel A. *Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and management issues.* s.l. : McGraw-Hill, 1993.

Viena University of Technology. *Biogas to Biomethane Technology Review.* Viena :, 2012.

Tejas Gas de Toluca. [Online] <http://www.tejasgas.com.mx/gasoducto.html>.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado
en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

Facultad de Ingeniería. Evaluación de Alternativas. [Online] [Cited: Diciembre 08, 2014.]http://www.ingenieria.unam.mx/~jkuri/Apunt_Planeacion_internet/TEMAVI.4.pdf.

Wellinger, A, Murphy, Jerry and Baxter, David. *The Biogas Handbook*. s.l. : Woodhead Publishing Series in Energy, 2013. 52.

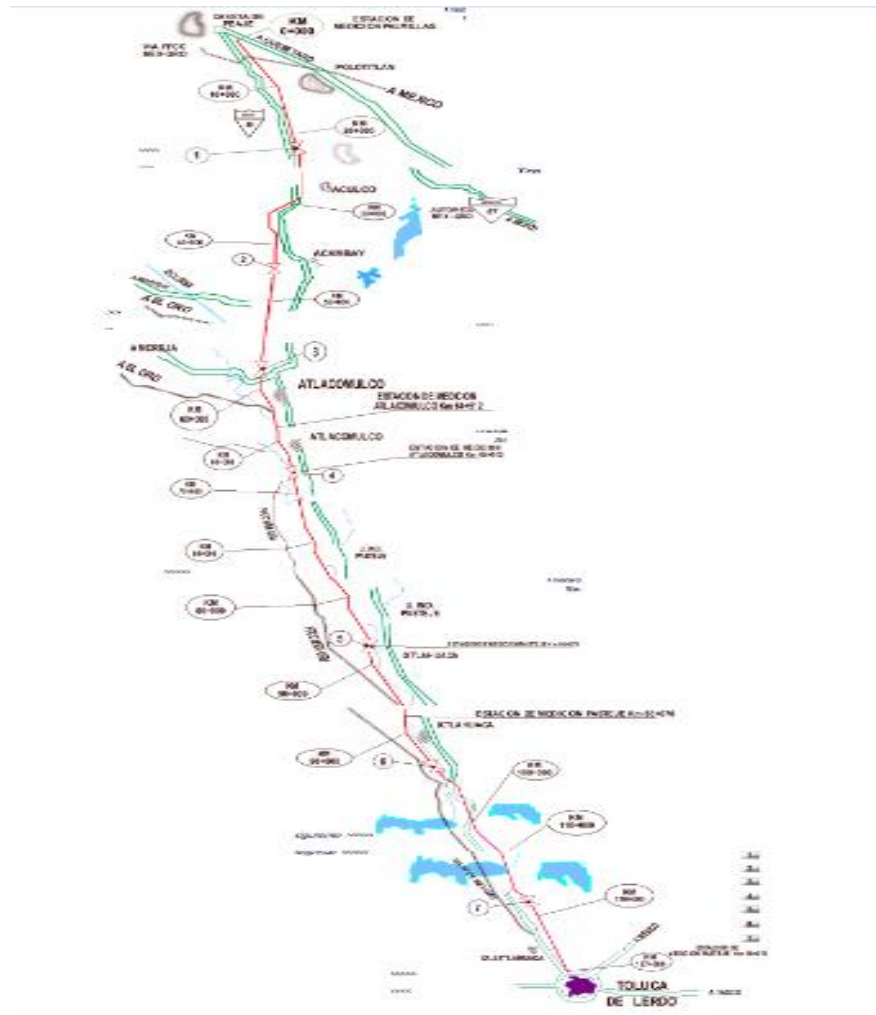
Zicari, Steven McKinsey. *Removal of Hydrogen Sulfide from biogas using cow-manure compost*. Cornell, E.U.A. : Thesis Master of Science, Cornell University, 2003.



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

ANEXOS.

8.1 MAPA DE GASODUCTO EN EL ESTADO DE MÉXICO.





8.2 BALANCE DE MATERIA PARA EL BIOGÁS.

El balance de materia para la producción de biogás se generó en el grupo de trabajo de Ingeniería Ambiental.

Se tomó como base de cálculo 100 toneladas al día de RSOM. Tomando 20% de los RSOM como sólidos totales (ST), este valor se tomó en función de las caracterizaciones hechas en el grupo de trabajo.

El reactor que se propuso es a base seca y a una temperatura de operación de 37° Celsius.

Se tomará una relación de sólidos volátiles en sólidos totales de 0.8 de acuerdo con (Tchobanoglous, y otros, 1993 pág. 88), este valor representa la biodegradabilidad de los componentes de los residuos orgánicos. El factor de destrucción de sólidos volátiles en el digestor se tomó de 0.06.

$$\text{Producción de biogás} = \frac{\text{Masa de FORSU} * \% \text{ sólidos totales} * \frac{\text{Sólidos volátiles}}{\text{Sólidos totales}} * \text{Factor de destrucción}}{(1 - \% \text{ de agua en la FORSU})}$$

La producción del biogás de acuerdo con la ecuación anterior es de 9711.89 kg/día. Se tomará como capacidad normal de producción de biogás 351.14 Nm³/h. Como la producción de biogás varía en los digestores anaerobios es necesario tomar en cuenta una capacidad máxima que es de 357.15 Nm³/h.

La composición del biogás se tomó de la literatura (Tchobanoglous, y otros, 1993), estimando un porcentaje de agua de acuerdo con las caracterizaciones hechas en el grupo de trabajo (Ver Tabla 31).

Tabla 31 Composición del biogás estimada para el caso de estudio.

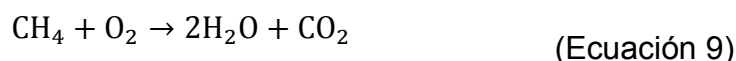
Composición	(%mol)
CH ₄	55.00%
CO ₂	43.10%
H ₂ O	1.80%
H ₂ S	0.10%



8.3 CÁLCULO DEL CONTENIDO ENERGÉTICO EN EL BIOGÁS

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión referida a la unidad de masa del combustible, en este caso del metano.

La reacción de combustión del metano es la siguiente:



La entalpía de reacción del metano se representa de la siguiente manera:

$$\Delta H_{r\text{CH}_4} = 2H_{f\text{H}_2\text{O}(\text{gas})} + H_{f\text{CO}_2} - \Delta H_{f\text{CH}_4} \quad (\text{Ecuación 10})$$

En la Tabla 32 se presentan las entalpías de formación para los siguientes componentes.

Tabla 32 Tabla de entalpías de formación (Admson, 1979)

Componentes	Hf (kJ/mol)
CH₄	-74.85
H₂O liq	-285.84
H₂O gas	-241.79
H₂S	-20.63
SO₂	-296.9
CO₂	-393.51
C₂H₄	-1559.88

Para el cálculo del poder calorífico inferior se considera que el vapor del agua contenido en los gases de combustión no condensa. Para el caso 2, el poder calorífico de cálculo de la siguiente manera (NOM-001-2010):

$$\Delta H_{r\text{CH}_4} = 2 * (-241.79) + (-393.51) - (-74.85) = -802.24 \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$\text{PCI} = 802.24 * .5220 = -418.80 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} * \left(\frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}}\right) * \left(\frac{10^6 \text{ MJ}}{1 \text{ J}}\right) = 0.42 \frac{\text{MJ}}{\text{mol}} \quad (\text{Ecuación 12})$$



Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos.

$$PCI = 0.42 \frac{\text{MJ}}{\text{mol}} * \left(\frac{8769.97 \text{ mol de biogás limpio}}{\text{h}} \right) = 3672.84 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} \text{ (Ecuación 13)}$$

$$PCI = 0.42 \frac{\text{MJ}}{\text{mol}} * \left(\frac{8769.97 \text{ mol de biogás limpio}}{\text{h}} \right) = 3672.84 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} \text{ (Ecuación 14)}$$

$$PCI = 3672.84 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} * \left(\frac{1 \text{ hora}}{196.43 \text{ m}^3 \text{ de biogás limpio}} \right) = 18.70 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \text{ (Ecuación 15)}$$

$$\text{Contenido energético} = 18.70 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} * \left(\frac{10^6 \text{ J}}{\text{MJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kWh}}{3.6 \times 10^6} \right) = 5.19 \text{ kW/m}^3 \text{ (Ecuación 16)}$$

El poder calorífico superior es la cantidad de energía térmica producida por la combustión de una unidad de volumen medido en base seca de gas natural con aire a condiciones estándar, se determina en fase líquida (NOM-001-2010).

$$\Delta H_{r\text{CH}_4} = 2 * (-285.84) + (-393.51) - (-74.85) = -890.34 \text{ kJ/mol} \text{ (Ecuación 17)}$$

$$PCS = 890.34 * .5220 = -464.79 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} * \left(\frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \right) * \left(\frac{10^6 \text{ MJ}}{1 \text{ J}} \right) = 0.46 \frac{\text{MJ}}{\text{mol}} \text{ (Ecuación 18)}$$

$$PCS = 0.46 \frac{\text{MJ}}{\text{mol}} * \left(\frac{8769.97 \text{ mol de biogás limpio}}{\text{h}} \right) = 4076.18 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} \text{ (Ecuación 19)}$$

$$PCS = 4076.18 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} * \left(\frac{1 \text{ hora}}{196.43 \text{ m}^3 \text{ de biogás limpio}} \right) = 20.75 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \text{ (Ecuación 20)}$$

$$\text{Contenido energético} = 20.75 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} * \left(\frac{10^6 \text{ J}}{\text{MJ}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kWh}}{3.6 \times 10^6} \right) = 5.76 \text{ kW/m}^3 \text{ (Ecuación 21)}$$