



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**APLICACIÓN DE BIOGÁS EN TRANSPORTE Y MEDICIÓN DE EMISIONES  
DE GASES CRITERIO, DE EFECTO INVERNADERO Y PARTÍCULAS  
GENERADAS POR UN VEHÍCULO A GNC Y OTRO A DIESEL.**

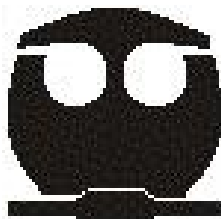
**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**ULISES ROJAS ZAMORA**



**MÉXICO, D.F.**

**2010**



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:** Profesor: Jesus Torres Merino

**VOCAL:** Profesor: Juan José Ruiz López

**SECRETARIO:** Profesor: Javiera Cervini Silva

**1er. SUPLENTE:** Profesor: José Agustín García Reynoso

**2° SUPLENTE:** Profesor: Arón Jazcilevich Diamant

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: CENTRO DE CIENCIAS DE LA**  
**ATMÓSFERA, UNAM.**

**ASESOR DEL TEMA: JAVIERA CERVINI SILVA**  
**(nombre y firma)**

**SUPERVISOR TÉCNICO: ARON JAZCILEVICH DIAMANT**  
**(nombre y firma)**

**SUSTENTANTE: ULISES ROJAS ZAMORA**  
**(nombre (s) y firma (s) )**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Dra. Javiera Cervini y al Dr. Arón Jazcilevich por sus enseñanzas, el tiempo brindado y sobre todo, por ser dos personas con una grandeza espiritual inconmensurable, de esas que rara vez te encuentras en el camino.

A la Lic. Angélica Chávez de la empresa Gazel S.A. de C.V., al Ing. Luis Avelleyra de la empresa Dina Camiones S.A. de C.V. y al D.I. José Luis Manzano de MZ Prosil S.A. de C.V. por el suministro del GNC, del camión a GNC y del camión a Diesel. Sin ellos, la parte experimental de éste trabajo no hubiera sido posible.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera por brindarme los medios necesarios para desarrollar buena parte de este trabajo.

Muy en especial a la Facultad de Química de la UNAM.

## **DEDICATORIAS**

A mis padres, que haciendo todo el esfuerzo posible, aún en las situaciones más adversas, nunca dejaron de apoyarme, por la confianza que siempre han tenido en mí.

A mis hermanos, por su apoyo constate e incondicional en todos los sentidos, por sus extraordinarios consejos y por los maravillosos momentos que he podido pasar a lado de ellos. Ustedes han sido y serán siempre mi mejor guía.

A mis amigos y grandes compañeros: Nayeli Cabrera, Oscar Ciaca, Erika González, Adriana Hernández, Eliu Hidalgo, Victor Jiménez, Elizabeth Mora, Mayra Rosado, Yadira Sandoval, Jhonatan Vargas, Carlos Xinastle.

A los amigos de la Torre de Ingeniería: Eduardo Arteaga, Omar Jiménez, Jazmín López, a mi pana Pablo Piatti e Iris Sánchez.

A la bandita de primer semestre, sobre todo a mi queridísima Pame Fuentes y a Ricardo Flores.

A Dalilah Castillo, por aquellos grandes momentos compartidos y por ser una persona tan valiosa en mi vida.

*De cada cual, según su  
capacidad; a cada cual según  
sus necesidades.*

**K. Marx.**

	<b>Índice</b>
	<i>Página</i>
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivos.....	4
Hipótesis.....	4
CAPÍTULO II. APLICACIÓN DEL BIOGÁS EN TRANSPORTE.....	5
2.1 Composición del biogás .....	5
2.2 Tecnología de producción .....	8
2.2.1 Tratamientos de pre - digestión.....	8
2.2.2 Digestión.....	9
2.2.3 Post - digestión.....	9
2.3 Uso de biogás en transporte, tecnología vehicular.....	12
2.3.1 Compresión y almacenamiento del biogás .....	12
2.3.2 Distribución del biogás comprimido .....	16
2.3.2.1 Transporte por medio de carros tanque.....	16
2.3.2.2 Distribución por medio de gasoductos .....	17
2.3.2.3 Distribución por medio de la red de gas natural .....	17
2.3.3 Parámetros aplicados al biogás .....	18
2.3.4 Estándares de gas natural para homologación .....	21
2.3.5 Métodos y estaciones de suministro de biogás .....	23
2.4 Tecnologías involucradas en los autos limpios.....	25
2.4.1 Vehículos de servicio ligero.....	29
2.4.2 Vehículos de servicio pesado.....	29

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE EMPLEO DE BIOGÁS EN TRANSPORTE.....	31
3.1 Principales países productores de biogás .....	31
3.1.1 Unión Europea.....	31
3.1.2 Reino Unido.....	33
3.1.3 Alemania.....	34
3.2 Principales países y ciudades en el empleo de biogás como combustible en transporte .....	35
3.2.1 Suecia.....	35
3.2.1.1 Estocolmo .....	40
3.2.1.2 Linkoping .....	42
3.2.1.3 Gas natural y biogás en Suecia .....	43
3.2.2 Francia.....	44
3.2.3 Suiza.....	46
3.3 Experiencia internacional en diferentes categorías de autos operados mediante GNC.....	47
3.3.1 Fracasos en la aplicación de biogás en transporte .....	48
3.3.2 Éxitos en la aplicación de biogás en transporte .....	50
3.3.2.1 Impacto ambiental .....	50
3.3.2.2 Impacto sobre los clientes .....	51
3.3.2.3 Viabilidad económica.....	51
3.3.3 Experiencia en aplicación de la tecnología en autobuses .....	52
3.3.4 Flotas de HGV´s que operan con GNC.....	55
3.4 Lecciones aprendidas en el desarrollo de biogás en transporte ....	55

3.4.1 México .....	56
3.5 Factores que llevaron al éxito en países que han desarrollado el sector de biogás en transporte.....	58
CAPÍTULO IV. MEDICIONES EXPERIMENTALES DE EMISIONES	
CONTAMINANTES GENERADAS POR UN CAMIÓN A	
A GNC Y UNO A DIESEL.....	
	60
4.1 Metodología experimental.....	60
4.1.1 Medición de emisiones en campo.....	60
4.1.2 Ubicación del sitio de montaje del equipo y los ciclos de manejo.....	64
4.1.3 Descripción de los vehículos empleados.....	66
4.1.4 Composición de los combustibles empleados en las pruebas .....	68
4.1.5 Equipo de medición Axion.....	69
4.1.5.1 Portabilidad y requisitos de alimentación.....	69
4.1.5.2 Tiempo de montaje del equipo .....	70
4.1.5.3 Calibración del equipo .....	70
4.1.5.4 Vehículos y combustibles con los que opera el equipo.....	70
4.1.5.5 Variables de medición del equipo .....	71
4.1.5.6 Medición de flujo de gases.....	71
4.1.5.7 Gases contaminantes que mide el equipo .....	72
4.1.5.8 Sensores del equipo.....	72
4.1.5.9 Ventajas del equipo Axion.....	75



CAPITULO V. RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	76
5.1 Comparación general de emisiones por prueba .....	76
5.2 Emisiones generadas por recorrido y análisis por contaminante ..	79
5.2.1 Análisis de emisiones para los recorridos cortos .....	80
5.2.2 Análisis de recorridos largos .....	85
5.3 Análisis con respecto a la velocidad .....	90
5.4 Análisis con respecto al consumo de combustible .....	91
CAPÍTULO VI ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	95
CAPÍTULO VII ANEXO 1 CONTAMINANTES GENERADOS POR EL SECTOR TRANSPORTE EN MÉXICO Y CICLO DE VIDA DEL BIOGÁS .....	100
CAPÍTULO VIII ANEXO 2 TECNOLOGÍAS Y PROCESOS EXISTENTES PARA EL ACONDICIONAMIENTO DEL BIOGÁS .....	114
CAPÍTULO IX ANEXO 3 COSTOS IMPLICADOS EN LA OPERACIÓN Y COMPRA DE UN AUTO A BIOGÁS .....	130
CAPÍTULO X REFERENCIAS .....	138

## Índice de Figuras, Imágenes y Tablas

*Página*

### **Tablas**

Tabla 2.1	Propiedades típicas del biogás y de sus componentes.....	6
Tabla 2.2	Cuadro comparativo entre el biogás y el gas natural .....	7
Tabla 2.3	Grado de acondicionamiento según el uso del biogás.....	10
Tabla 2.4	Tecnologías empleadas para la eliminación de contaminantes del biogás.....	12
Tabla 2.5	Opciones de almacenamiento de biogás crudo y acondicionado .....	13
Tabla 2.6	Estándares de gas para pruebas de emisiones sobre vehículos...	23
Tabla 2.7	Estándares de gas para pruebas de emisiones sobre vehículos...	23
Tabla 3.1 a)	Número de vehículos de biogás en Suecia .....	39
Tabla 3.1 b)	Número de estaciones de suministro en Suecia .....	40
Tabla 3.1 c)	Volumen de biogás vendido en Suecia (kNm <sup>3</sup> ).....	40
Tabla 3.2	Principales ciudades del mundo en aplicación del biogás en transporte .....	41
Tabla 3.3	Ejemplos de pruebas en autobuses con combustibles limpios .....	54
Tabla 4.1	Fechas, horas y duración de las tres pruebas de medición de emisiones .....	60
Tabla 4.2	Comparación entre las características de cada uno de los dos camiones usados .....	67
Tabla 4.3	Composición del GNC empleado en las primeras dos pruebas...	68
Tabla 5.1	Promedio general de emisiones para cada una de las tres pruebas .....	76
Tabla 5.2	Promedios de emisiones por kilómetro para cada una de las tres pruebas .....	77
Tabla 5.3	Emisiones promedio por kilómetro para cada uno de los recorridos que conforman las pruebas.....	79

Tabla 5.4	Emisiones promedio para los recorridos cortos.....	81
Tabla 5.5	Emisiones promedio para los recorridos largos.....	85
Tabla 5.6	Comparación de promedios de velocidad para los diferentes recorridos .....	90
Tabla 5.7	Consumo de combustible por parte de los dos combustibles .....	92
Tabla 5.8	Consumo y costo de combustible por la operación en 100 km de recorrido .....	93
Tabla 7.1	Comparación entre las emisiones generadas el diesel contra las generadas por el biogás.....	105
Tabla 7.2	Consumo de combustible para cada una de las categorías autos estudiadas .....	110
Tabla 9.1	Costos adicionales de capital y de mantenimiento adicionales para autos de GNC .....	133
Tabla 9.2	Comparación entre el costo y consumo de combustible de GNC, diesel y gasolina.....	135
Tabla 9.3	Costos adicionales de operación y costos totales de combustible .....	136

## **Figuras**

Figura 1.1	Emisiones de CO2 por sector, del año 1990 al 2002.....	2
Figura 2.1	Esquema representativo del proceso de compresión y llenado de cilindros contenedores de biogás .....	14
Figura 3.1	Principales países productores de biogás en Reino Unido para el 2003.....	34
Figura 3.2	Producción de biogás para uso en transporte.....	36
Figura 3.3	Producción de biogás para transporte en términos de GWh .....	39
Figura 3.4	Distribución de biogás / gas natural como combustible en transporte en Suecia 1995-2003.....	43
Figura 3.5	Desarrollo de vehículos de gas en Suecia 1995-2003.....	44
Figura 5.1	Promedio general de emisiones por kilómetro para cada una de las tres pruebas.....	77

Figura 5.2	Comparación de emisiones de CO <sub>2</sub> (g/km) generadas en recorridos cortos .....	82
Figura 5.3	Comparación de emisiones de CO (mg/km) generadas en recorridos cortos .....	82
Figura 5.4	Comparación de emisiones de HC (mg/km) generadas en recorridos cortos .....	83
Figura 5.5	Comparación de emisiones de NO <sub>x</sub> (mg/km) generadas en recorridos cortos .....	84
Figura 5.6	Comparación de emisiones de PM <sub>10</sub> (mg/km) generadas en recorridos cortos .....	84
Figura 5.7	Comparación de emisiones de CO <sub>2</sub> (g/km) generadas en recorridos largos .....	86
Figura 5.8	Comparación de emisiones de CO (mg/km) generadas en recorridos largos .....	87
Figura 5.9	Comparación de emisiones de HC's (mg/km) generadas en recorridos largos .....	88
Figura 5.10	Comparación de emisiones de NO <sub>x</sub> (mg/km) generadas en recorridos largos .....	89
Figura 5.11	Comparación de emisiones de PM <sub>10</sub> (mg/km) generadas en recorridos largos .....	90
Figura 7.1	Contribución por el sector transporte a las emisiones totales de contaminantes atmosféricos en México.....	101
Figura 7.2	Contribución por el sector transporte a las emisiones totales de contaminantes atmosféricos en México.....	101
Figura 7.3	Límites de emisiones de contaminantes fijados por la norma Euro para vehículos diesel en sus diferentes versiones .....	106
Figura 7.4	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para un auto de pasajeros de 1.6 L.....	112
Figura 7.5	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para vehículos de ligeros .....	112
Figura 7.6	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para vehículos genéricos de servicio pesado de 38 toneladas .....	113
Figura 7.7	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para autobuses .....	113

Figura 8.1	DFP del proceso de absorción de CO <sub>2</sub> con agua.....	116
Figura 8.2	DFP simplificado del proceso de adsorción con tamices de carbón .....	120
Figura 8.3	Diagrama de la difusión de CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S en absorción gas – líquido.....	122

## **Imágenes**

Imagen 4.1	Conexión del manómetro al múltiple de entrada del motor .....	61
Imagen 4.2	Conexión del termopar al múltiple de entrada del motor (el termopar es pegado al múltiple por medio de cinta negra) .....	62
Imagen 4.3	Montaje del medidor óptico de RPM.....	63
Imagen 4.4	Sondas de Medición de Emisiones.....	64
Imagen 4.5	Ciclo de manejo corto seguido dentro de Ciudad Universitaria, Ciudad de México .....	65
Imagen 4.6	Ciclo de manejo largo seguido dentro de Ciudad Universitaria, Ciudad de México .....	65
Imagen 4.7	Camión de GNC - DINA usado en las primeras dos pruebas .....	66
Imagen 4.8	Camión diesel usado en la tercera prueba .....	67
Imagen 4.9	Descripción del equipo de medición Axion .....	69
Imagen 4.10	Instrumento Andros 6500.....	73
Imagen 4.11	Sensor de oxígeno Andros .....	74

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante el transcurso del pasado y el presente siglo se observado un consumo masivo de combustibles fósiles como la gasolina y el diesel. Este fenómeno tiene un efecto directo sobre la generación de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que es uno de los principales gases de efecto invernadero GEI. El problema que se genera por las altas emisiones de los GEI es que, cuando estos llegan a la atmósfera terrestre retienen parte de la energía que el suelo emite por haber sido calentado por la energía solar, generándose el efecto invernadero (Green Peace, 2009).

El efecto invernadero es el causante del calentamiento global del planeta que se refleja a su vez en el cambio climático experimentado durante las últimas décadas (IPCC, 2007). El cambio climático es, pues, no solo el mayor problema ambiental del siglo pasado, sino también del presente siglo. Así mismo, el cambio climático es un problema que le atañe a todos los países, y por lo tanto, es preciso conjuntar e incrementar los esfuerzos globales de mitigación, así como desarrollar estrategias de adaptación.

En la Figura 1.1 se muestra la distribución de los sectores generadores de emisiones de GEI en México. Como se puede ver, uno de los principales generadores es el sector transporte. Este sector presenta un consumo aproximado de 2,157 PJ<sup>1</sup> por año, y el 90.7% de esta energía consumida corresponde al autotransporte (SENER, 2007).

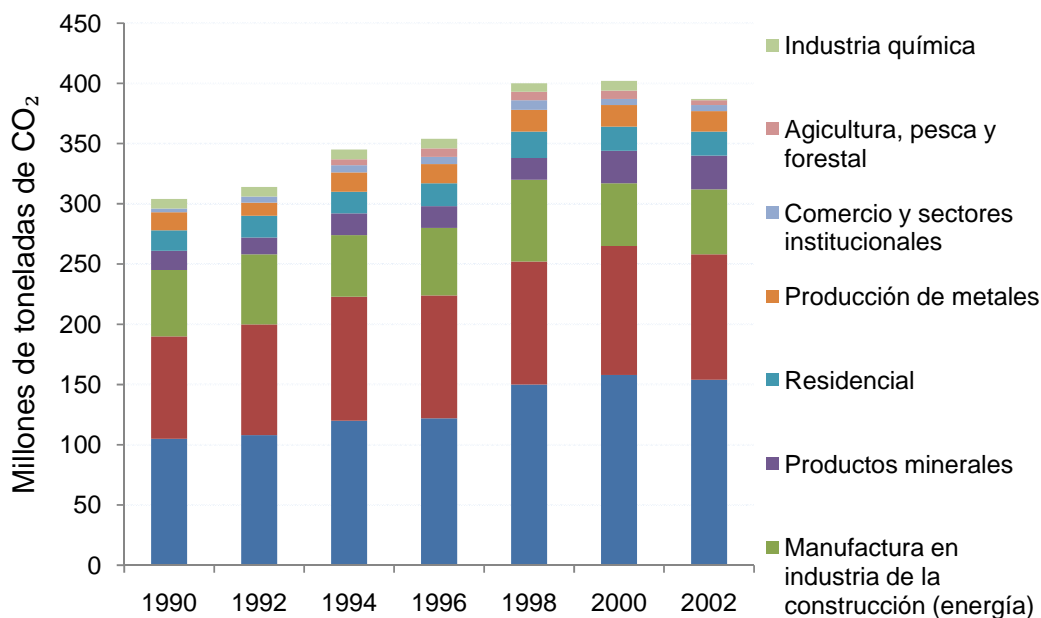
Siendo el sector autotransporte uno de los que mayores emisiones de GEI genera (Figura 1.1), resulta imperante la necesidad de sustituir combustibles fósiles por con el fin de dar una solución integral a problemas

---

<sup>1</sup> Un Peta Joule (PJ) corresponde a 10<sup>15</sup> Joules.

ambientales, y de salud pública. En este sentido, en los últimos años se ha propuesto la utilización de biocombustibles (la obtención de energía a partir del uso de la biomasa), argumentándose que estos representan una solución viable para la disminución de emisiones (Masera, 2005).

**Figura 1.1 Emisiones de CO<sub>2</sub> por sector, del año 1990 al 2002 (INE, 2003).**



El biogás resulta ser uno de los biocombustibles que cuenta con mayor potencial para sustituir a los combustibles fósiles como la gasolina y el diesel en el sector transporte (NSCA, 2006). Esto se debe a que el biogás es uno de los biocombustibles que mayores beneficios al ambiente genera con respecto a los combustibles fósiles, no sólo en lo que se refiere a la quema del mismo en el motor de combustión interna, sino en todo su ciclo de vida (para ver un análisis más detallado del ciclo de vida, consultar el anexo 1).

El biogás es generado por medio del proceso de digestión anaerobia (DA), que consisten en descomposición de la materia orgánica en presencia de diferentes bacterias en condiciones anaerobias (Wheeler et al., 2002). La DA

tiene una gran ventaja respecto a otros procesos de producción de biocombustibles porque, además de biogás, se produce un bio - fertilizante de alta calidad una vez que el nitrógeno orgánico se transforma a nitrógeno amoniacal o amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). Las sales de amonio son los constituyentes principales de los fertilizantes comerciales para riego en zonas agrícolas (Díaz, 2001). En este sentido, el impacto generado por la introducción de los sistemas de biogás no tiene solo que ver con la reducción en emisiones cuándo éste es quemado en un motor, sino que el sistema a partir del cual se produce dicho combustible (DA), tiene otros impactos sobre el medio ambiente (ver Anexo 2).

Los impactos ambientales globales asociados con la DA dependen del sistema de gestión de desechos que la DA modifica o sustituye, y del uso o aplicación del biogás producido (Börjesson, 2007). Algunos de los efectos del DA y su la aplicación sobre el medio ambiente incluyen (Krich et al., 2005):

- Reducción de las emisiones de GEI
- Reducción de emisiones de contaminantes criterio,  $\text{NO}_x$ , HC, CO, y PM.
- Control de olores
- Control de patógenos

El presente trabajo de tesis se enfocará a estudiar la aplicación del biogás en transporte, y se hará la determinación experimental de las emisiones generadas por la quema del biogás en un motor de combustión interna. Sin embargo, debido a que la tecnología de producción de dicho energético es muy pobre en nuestro país, resulta complicado obtener el biogás en condiciones adecuadas (contenido de metano  $> 95\%$  y presurizado a 250 bares) para que sea aplicado directamente al tanque de combustible de un auto. Por lo tanto, las pruebas de determinación de emisiones se harán con gas natural



comprimido. Se parte del supuesto de que el biogás, una vez que ha sido lavado y comprimido, es muy similar en composición al gas natural comprimido. En principio, entonces, el gas natural comprimido deberá de generar emisiones muy similares a las que generaría el biogás comprimido.

**Objetivo:**

Determinar el grado de reducción o aumento en emisiones de gases criterio (CO, NOx, HC), material particulado (PM<sub>10</sub>) y gases de efectos invernadero (CO<sub>2</sub>), que se genera por la operación de un camión a gas en comparación con un camión a diesel.

**Objetivos específicos:**

Comparar la cantidad de contaminantes en gramos o miligramos por kilómetro que se generan por la operación de camiones a GNC y diesel.

Determinar el efecto de la velocidad sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO, HC's, NOx y PM<sub>10</sub>.

Determinar la influencia que las pendientes pronunciadas, presentes en el ciclo de manejo, tienen sobre la generación de emisiones de CO<sub>2</sub>, CO, HC, NOx y PM<sub>10</sub>.

Determinar el consumo de combustible para los dos vehículos y determinar cuál de los dos es más viable económicamente hablando.

Por medio de un análisis del estado de arte, determinar cuáles son los factores determinantes para la correcta aplicación del biogás en transporte.

**Hipótesis:**

El GNC (sustituto directo del biogás en nuestro estudio), debe de generar una reducción importante en la generación de emisiones CO<sub>2</sub>, CO, HC's, NOx y PM<sub>10</sub>, con respecto al diesel.

## **2. APLICACIÓN DEL BIOGÁS EN TRANSPORTE**

En este capítulo se procede a dar una panorámica general del biogás y cómo puede ser aplicado en transporte como un combustible en sustitución de sus homólogos, los combustibles fósiles.

### **2.1 Composición del biogás**

El biogás generado a partir del proceso de DA es una mezcla de gases constituida principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), con pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Sin embargo, es también posible encontrar cantidades traza de otros compuestos, tales como hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), hidrocarburos halogenados, nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) carbohidratos saturados o halogenados y oxígeno ( $\text{O}_2$ ) (Wheeler, 2005) (Tabla 2.1). Además de los compuestos mencionados anteriormente, generalmente la mezcla gaseosa está saturada con vapor de agua, partículas de polvo y siloxanos.

La proporción en la que se encuentran los compuestos antes mencionados depende en gran medida del tipo de materia prima a partir de la cual sea producido el biogás (Persson et al., 2006). A su vez, la proporción en la que se encuentren todos los compuestos mencionados, será un factor que determinará en gran medida el contenido energético del biogás. Entre más alto sea el contenido de  $\text{CH}_4$  en el biogás, el contenido energético será más alto.

El biogás puede ser producido a partir de la DA de los siguientes tipos de materias primas (NSCA, 2006):

- Lodos de aguas residuales.
- Estiércol animal.

- Residuos generados por el procesamiento de alimentos y locales comerciales.
- Desechos de jardín y de cocina.
- Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos.

A parte de la DA, todos los desechos orgánicos pertenecientes a alguno de los tipos mencionados pueden ser tratados mediante otros procesos, tales como el compostaje, esparcidos directamente a la tierra o vertidos directamente al basurero.

**Tabla 2.1 Propiedades típicas del biogás y de sus componentes.**

Parámetro	Unidades	Biogás
Densidad	Kg/m <sup>3</sup> N	1.2
Índice Wobbe alto	MJ/m <sup>3</sup> N	27
Número de metano		>135
Metano	% Vol	53-70
Hidrógeno	% Vol	0
Monóxido de carbono	% Vol	0
Dióxido de carbono	% Vol	30 – 47
Nitrógeno	% Vol	0 - 0.2
Oxígeno	% Vol	0
Ácido sulfhídrico	ppm	<1000
Amoníaco	ppm	<100

Fuente: (Persson et al., 2006)

Siendo el metano (CH<sub>4</sub>) el componente en mayor proporción, y el que determina el contenido energético del biogás (BG) y del gas natural (GN), en la

Tabla 2.2 se presenta una comparación entre las propiedades características de dichos combustibles. En dicha tabla se puede notar que la diferencia entre el poder calorífico de ambos gases es significativo. Esto se debe principalmente a la diferencia en el contenido de CH<sub>4</sub>, 95 - 99% para el GN, 53 - 70% para el BG.

Un biogás con un poder calorífico tan bajo como el que se muestra en la Tabla 2.2, resultaría inservible para aplicaciones en transporte. Con el fin de incrementar su poder calórico y de eliminar componentes no deseados como el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, hidrocarburos halogenados y siloxanos, que podrían dañar los motores de combustión interna de los autos, se lleva a cabo un proceso de remoción de dichos compuestos aplicado al biogás. El resultado final del proceso de remoción, es un biogás con características muy similares a las del gas natural, que por lo tanto, pudiera ser utilizado directamente como combustible en transporte. Así mismo, su utilización podría estar contemplada para la inyección directa en la red de gas natural.

**Tabla 2.2 Cuadro comparativo entre el biogás y el gas natural.**

Parámetro	Unidades	Gas natural	Biogás
Valor calorífico (bajo)	MJ/m <sup>3</sup>	36.14	21.48
Densidad	Kg/m <sup>3</sup> N	0.82	1.21
Máxima velocidad de ignición	m/s	0.39	0.25
Req. teórico de aire	m <sup>3</sup> aire/m <sup>3</sup> gas	9.53	5.71
Max. concentración CO <sub>2</sub> en la chimenea	% vol	11.9	17.8
Punto de rocío	°C	59	60-160

Fuente: (Wheeler, 2005)

## **2.2 Tecnología de producción.**

Dentro del proceso de producción de biogás para fines de transporte, existen tres fases que son esenciales para lograr producir y entregar al operador del vehículo un combustible con la calidad necesaria para lograr un desempeño óptimo del automóvil.

Dichas fases del proceso son las siguientes:

- Tratamientos de pre-digestión.
- Digestión.
- Tratamientos de pos-digestión del biogás y del fertilizante (abono).

### **2.2.1 Tratamientos de pre - digestión.**

El objetivo primordial que se persigue en el proceso de pre-digestión, es lograr que la materia prima por digerir se encuentre en las mejores condiciones. Esto es, que presente el mayor contenido de materia orgánica o sólidos volátiles y a su vez la menor cantidad de contaminantes. El propósito es obtener los mejores resultados en términos de rendimiento - calidad del biogás y del bio-fertilizante (NSCA, 2006). El proceso y el grado de pre-tratamiento necesario dependerá en gran medida de la calidad de la materia prima que se utilizará en el proceso de la DA. Pero en general, dicho proceso está integrado por alguna de las siguientes etapas (Wheeler, 2005):

- Clasificación y eliminación de materiales inorgánicos, tales como piedras, arena y vidrio.
- Trituración o maceración para reducir el tamaño del material que será digerido.
- La mezcla de diferentes materias primas, si más de una se está utilizada

- Adición de agua u otros líquidos.
- La pasteurización o la esterilización de algunas materias primas tales como los subproductos animales con el fin de reducir los agentes patógenos.

El proceso de pre-tratamiento de la materia sujeta a la DA suele ser una parte importante del proceso global de DA. Esto debido a que los rendimientos y la calidad de los productos finales dependerán en gran medida del grado y tipo de proceso de pre-tratamiento aplicado. Por ejemplo, cuando en la planta se utiliza la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) como materia prima, la planta de pre-tratamiento representa una parte significativa de la planta de producción de biogás, en donde el grado de separación y selección que se requiere para que la calidad de la FORSU sea la correcta suele ser alto debido a la composición tan variada de los residuos sólidos urbanos (Wheeler, 2005).

### **2.2.2 Digestión.**

Esta es la etapa fundamental del proceso. El material es degradado de forma natural por la acción de diferentes especies de bacterias en recipientes cerrados herméticamente llamados *biodigestores*. El producto final se denomina *biogás*.

### **2.2.3 Post - digestión.**

Cuando el biogás se obtiene de forma cruda, a través del proceso de DA, contiene CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y trazas de otros compuestos. De estos

compuestos, el CH<sub>4</sub> es el componente que contribuye al valor energético del biogás.

Cuando se pretende emplear el biogás en algún proceso, es necesaria una fase de remoción de ciertos componentes con el fin de enriquecer a la corriente en su contenido de CH<sub>4</sub>. El tipo y grado de remoción de los componentes dependerá del proceso en el que se pretenda emplear el biogás (Tabla 2.3). A dicho proceso de eliminación de compuestos no deseados del biogás crudo se le llama generalmente proceso de acondicionamiento y generalmente, es la fase esencial del proceso de post-digestión (Alexandesrsson, 2003).

**Tabla 2.3 Grado de acondicionamiento según el uso del biogás.**

Acondicionamiento / uso	Componentes a eliminar
Calor	Agua, azufre
Energía eléctrica / cogeneración	Agua, ácido sulfhídrico, compuestos orgánicos halogenados
Combustible para transporte	Agua, ácido sulfhídrico, compuestos orgánicos halogenados, oxígeno, CO <sub>2</sub> .
Red de gas	Agua, ácido sulfhídrico, compuestos orgánicos Halogenados, oxígeno, CO <sub>2</sub> .

Fuente: (Alexandesrsson, 2003)

Para la aplicación de biogás en transporte, los compuestos contaminantes tienen que ser removidos del biogás para lograr cumplir con los estándares y lograr de esta forma que el biogás pueda utilizarse como combustible para vehículos. El propósito general que se persigue con el proceso de acondicionamiento es enriquecer al biogás en su contenido energético mediante la eliminación de  $\text{CO}_2$ . De esta manera se logra que el componente en mayor proporción sea el  $\text{CH}_4$ . Además, durante el proceso de acondicionamiento se eliminan compuestos como el  $\text{H}_2\text{S}$  y las trazas de los otros gases presentes en el biogás crudo que, aunque se encuentren en concentraciones traza, causan daños por corrosión en los equipos y líneas de proceso en donde el biogás es manejado (Wheeler, 2005).

Para llevar a cabo el proceso de acondicionamiento, un número importante de tecnologías han sido desarrolladas, pero no todas son recomendadas para el biogás debido a factores económicos o ambientales. Las principales tecnologías para eliminar cada uno de los contaminantes presentes en el biogás y lograr que el biogás cumpla con los estándares necesarios para ser aplicado como combustible en transporte se describen de forma general en la Tabla 2.4 y de forma resumida en el Anexo 2.



**Tabla 2.4 Tecnologías empleadas para la eliminación de contaminantes del biogás.**

Componente a Eliminar	Tecnología
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Absorción con agua Absorción con polietilenglicol Adsorción por carbón activado (PSA) Membranas de separación
Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	Inyección aire / oxígeno al biodigestor Inyección de cloruro de hierro Adición de hidróxido u óxido de hierro Adsorción por carbón activado (PSA) Absorción con hidróxido de sodio
Siloxanos	Absorción en medio líquido
Oxígeno y nitrógeno (O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> )	Membranas de separación Adsorción por carbón activado
Vapor de agua (H <sub>2</sub> O)	Condensadores

## **2.3 Uso de biogás en transporte, tecnología vehicular.**

### **2.3.1 Compresión y almacenamiento del biogás.**

Una vez que el BG ha pasado por el proceso de acondicionamiento y tiene características muy similares a las del gas natural (GN), es comprimido a presiones entre 200 - 250 bares, siendo generalmente referido como biogás comprimido (BGC). El BGC es equivalente en composición al gas natural comprimido (GNC), y por lo tanto puede ser aplicado directamente como combustible en los autos a gas. Dicho BGC, en comparación con los

combustibles fósiles convencionales, presenta un contenido energético muy bajo, siendo de 24,000 BTU / galón, comparado con aproximadamente 120,000 BTU / galón para la gasolina y 140,000 BTU / galón para el diesel (Franz Hofmann, 2004).

El proceso de compresión y almacenamiento del BG consiste en una alimentación del combustible por parte de los tanques de almacenamiento a baja presión a los compresores, resultando un biogás comprimido a presiones entre 200 y 250 bares. Cabe señalar que es recomendable que el biogás sea comprimido en el intervalo de presiones señalado, esto con el fin de evitar la necesidad de una fase de compresión adicional en la propia estación de suministro (Krich et al., 2005). Una vez comprimido, el biogás es almacenado en tanques de acero antes de ser transportado al sitio o estación de suministro. Dependiendo de la aplicación que se le pretenda dar, son aplicados distintos sistemas de almacenamiento a diferentes presiones (Tabla 2.5).

**Tabla 2.5 Opciones de almacenamiento de biogás crudo y acondicionado.**

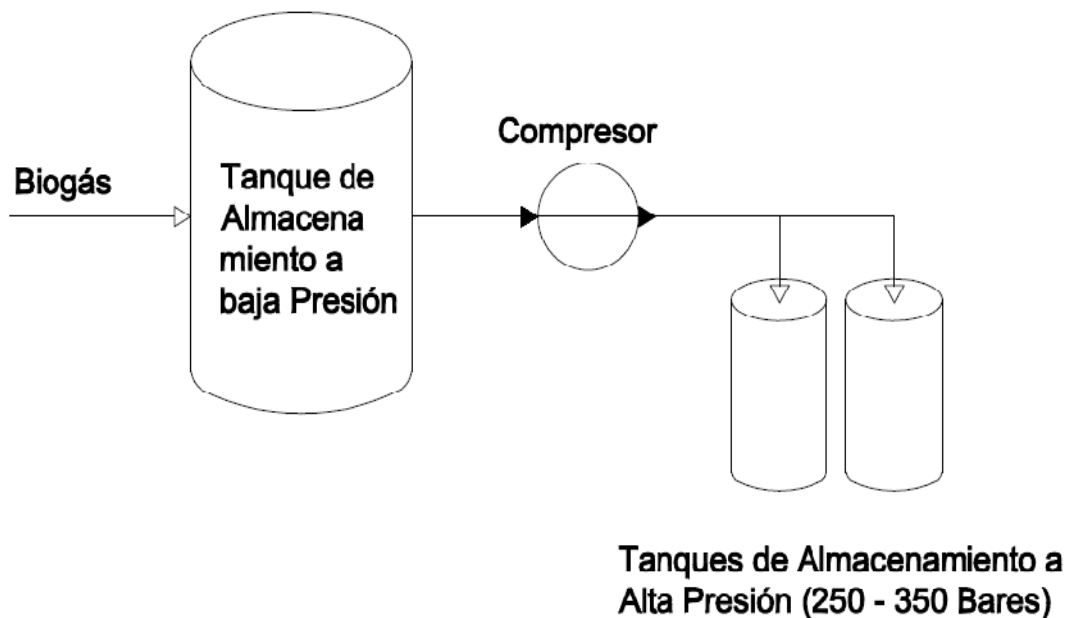
Propósito de almacenamiento	Presión (psig)	Dispositivo de almacenamiento	Material	Tamaño (m <sup>3</sup> )
Corto y mediano almacenamiento para uso en la misma granja	<2	Bolsa de gas	Plástico reforzado y no reforzado	4 – 311
	2 -6	Tanque con sello de agua	Acero	100
Almacenamiento para uso externo a la granja u otra fuente de generación	10 - 2,900	Tanques de butano o propano	Acero	57
	>2900	Cilindros comerciales de gas	Aleaciones de acero	10
		Tanques de mayor capacidad	Aleaciones de acero	276

Fuente: (Krich, 2005)

Tomando en cuenta que el BGC es un gas potencialmente explosivo, las instalaciones de almacenamiento-suministro deber de ser seguras, contando con discos de ruptura y válvulas de relevo de presión y sistemas de detección de fugas (Krich et al., 2005).

El hecho de que para la aplicación en transporte, el biogás requiera ser almacenado a altas presiones antes de que sea suministrado al tanque de combustible del auto, implica costos relativamente elevados. Además, la energía de compresión suele ser alta, requiriendo 14 KWH de energía para comprimir 28.3 m<sup>3</sup> de biogás acondicionado a 140 bares. En este sentido se considera que la energía de compresión corresponde al 17% del contenido total de energía del gas (Krich et al., 2005). El esquema representativo del proceso de llenado se muestra en la Figura 2.1.

**Figura 2.1 Esquema representativo del proceso de compresión y llenado de cilindros contenedores de biogás. (Krich et al., 2005).**



Una vez que el biogás ha sido comprimido y almacenado en la estación de suministro, éste es depositado en los tanques de almacenamiento de los vehículos mediante una de de las dos formas básicas siguientes:

- Comprimido: El uso en la forma comprimida se da de la misma forma que el gas natural comprimido (GNC), siendo ésta la forma más común de almacenamiento de combustible en el vehículo. El gas se almacena a alta presión, a unos 200 - 250 bares de presión en los tanques.

El problema de este método de abastecimiento es que la cantidad de energía almacenada en el gas comprimido es significativamente menor que la energía almacenada en el mismo volumen de un combustible líquido como el diesel. Por lo tanto, el intervalo de operación de los vehículos a gas tiende a ser menor que el correspondiente a los vehículos convencionales de gasolina o diesel (NSCA, 2006).

- Licuada: Con el fin de lograr un intervalo de manejo similar al de los vehículos convencionales, algunos vehículos almacenan el biogás en su forma licuada. Conocido comúnmente como gas natural licuado (GNL) o biogás licuado (BGL). Por medio del proceso de licuefacción el volumen del biogás es reducido en un factor de 600 veces aproximadamente, lo que lleva a que se incremente su densidad energética de forma considerable (Linné et al., 2004).

En dicho proceso, el gas es enfriado y comprimido con el fin de que se de un cambio de fase del estado gaseoso al líquido. Después de dicho proceso, una vez que el biogás se encuentra en su fase líquida, el biogás es almacenado en tanques de alta presión en el vehículo. Este método es más común en los vehículos pesados, en los que la carga útil

y el intervalo de manejo son más críticos para el funcionamiento del vehículo (NSCA, 2006).

### **2.3.2 Distribución del biogás comprimido.**

La distribución del biogás desde la planta de producción-acondicionamiento hasta la estación de suministro es un proceso que debe de ser tomado en cuenta dentro del análisis global de la aplicación del biogás en transporte. Se tendrá que tomar en cuenta - de acuerdo a la capacidad de generación de la planta de biogás - cuántos carros tanque (pipas) o kilómetros de tubería serán necesarios para transportar el biogás a la estación de suministro. Esto con el fin de evitar el uso y construcción de tanques de almacenamiento, los cuales resultan en una elevación de los costos de capital y operación de la planta. Así, los costos involucrados en el transporte del biogás dependerán de la distancia que tenga que recorrer el biogás desde la planta de producción hasta la estación de suministro (Wheeler et al., 2002).

#### **2.3.2.1 Transporte por medio de carros tanque.**

Si la distribución del biogás por medio de gasoductos o de la red de Gas Natural resulta impráctica o muy cara, el transporte por medio de carros tanque del biogás comprimido puede representar una buena opción de distribución (Krich et al., 2005).

Dados los costos de capital de los carros tanque y del transporte mismo del biogás a través de éstas, así como la probable necesidad de compresión adicional en el punto de consumo (estación de suministro), los costos de transporte de biogás por unidad de volumen son generalmente más caros

cuando es transportado por medio de un carro tanque que cuando se transporta por medio de un gasoducto (Krich et al., 2005). Por tanto, este método de distribución biogás no es considerado generalmente como una solución rentable a largo plazo, más bien se utiliza como una solución temporal. Por ejemplo, como medio de ampliar el uso de del biogás como combustible para transporte en un nuevo mercado, antes de la instalación de la infraestructura de suministro adecuada (Krich et al., 2005).

En lo que se refiere a los costos de los carros tanque, éstos tendrán que ser agregados a los costos de capital de la planta así como los costos de operación y mantenimiento de las mismas.

#### **2.3.2.2 Distribución por medio de gasoductos.**

Si el punto final de consumo, en este caso la estación de suministro, se encuentra relativamente cerca de la planta de generación biogás (menos de 2 kilómetros), entonces el biogás puede ser distribuido por medio de líneas o ductos dedicados exclusivamente al transporte de este energético.

Los costos de tendido de ductos para transporte de biogás varían mucho pero, generalmente oscilan en el intervalo de 100,000 a 250,000 USD por milla. Por ejemplo, una línea de gas que sirve a la planta de Boras en Suecia que mide 4 millas de largo, tuvo un costo de 213,000 USD por milla (Krich et al., 2005).

#### **2.3.2.3 Distribución por medio de la red de gas natural.**

La red de ductos de gas natural ofrece un potencial ilimitado de distribución de biogás. Dado que las tuberías de gas natural normalmente

pertenecen a los servicios públicos de gas ya sea privado o municipal, el productor del biogás debe negociar un acuerdo con el propietario de la tubería (es decir, la compañía de gas local) para el suministro biogás a través de las tuberías de gas natural. Para lograr tal acuerdo será necesario que de manera previa se cumpla con el requisito de que el biogás inyectado a la red de gas natural cumpla cabalmente con los estándares de composición que la compañía maneje. Una vez que el biogás se inyecta en la red de gas natural de gasoductos, puede ser utilizado como un sustituto directo del gas natural por parte de cualquier equipo conectado a la red de gas natural, incluidos los aparatos de gas domésticos, comerciales, equipos de gas industrial, y las estaciones de suministro de GNC para transporte (Krich et al., 2005).

### **2.3.3 Parámetros aplicados al biogás.**

El objetivo principal del proceso de acondicionamiento es remover todos los componentes no deseados de la corriente de biogás para que dicha corriente esté dentro un intervalo de composición definido. Una vez que se cuenta con ese intervalo de composición, el biogás puede ser empleado en el proceso que más nos convenga, en este caso, como combustible para transporte. Las variaciones en la composición del biogás o gas natural más allá de los límites permisibles de calidad pueden llegar a ser perjudiciales de forma sustancial para el rendimiento del motor. Para evitar esto, existen diversos parámetros que nos sirven como indicadores de las variaciones en la composición del biogás.

El primer parámetro es el “Número de Metano”, que es una medida de la sensibilidad al golpeteo que presenta el gas natural o el biogás acondicionado.

El golpeteo del motor representa una de las principales preocupaciones concernientes a la operación de los motores recíprocos. Es por eso que es importante la determinación de este parámetro, que es una propiedad análoga al octanaje aplicado generalmente a la gasolina.

El número de octano para las gasolinas es medido por comparación de una gasolina desconocida con alguna mezcla determinada de iso-octano y n-heptano. Si la gasolina opera igual que una mezcla 90:10 de octano:heptano, entonces el número de octano de la gasolina será de 90. En nuestro caso, el metano es mucho menos sensible al golpeteo que la gasolina, y por lo tanto no es caracterizado mediante el octanaje si no por el "Número de Metano". El "Número de Metano" es definido entonces, mediante un procedimiento similar al del octanaje, pero no utilizando una mezcla de octano:heptano, si no una mezcla de metano:hidrógeno (Bruijstens et al.,2008).

La causa principal de la aparición del golpeteo en el motor y de la variación en el "Número de Metano" es la variación en la composición del biogás respecto a su porcentaje en  $\text{CH}_4$  más allá de los límites permisibles. Por lo tanto, cuando se presentan hidrocarburos tales como el etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) y butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), el "Número de Metano" (NM) varía fuertemente y se puede presentar el golpeteo en el motor. Los valores normales del NM para el GNC de la red pública están entre 75-100, pero muchos fabricantes de motores para autos de gas exigen un NM mínimo de 70 (Bruijstens et al.,2008).

Es importante analizar el desempeño de los automóviles cuando operan con un gas natural o biogás con un bajo "Número de Metano". Esto con el fin de notar las diferentes variaciones en el desempeño del motor y determinar que



tan perjudiciales son las variaciones en dicho parámetro. En estos casos, el bajo “Número de Metano” es generado principalmente por la presencia de hidrocarburos de alto peso molecular. Afortunadamente en el caso del biogás, el contenido de hidrocarburos de ese tipo, es prácticamente nulo (NSCA, 2006).

Además del número de metano, se cuenta con otro parámetro que nos es útil para los motores de gas. Dicho parámetro nos sirve para determinar el poder y la relación de equivalencia de los combustibles, así como los cambios que pueden resultar por una pobre operación o desempeño ambiental de los mismos. Dicho parámetro es llamado “Índice Wobbe” ( $I_w$ ) y es expresado por un valor numérico que se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$I_w = \frac{C_v}{\sqrt{DR}} \quad \text{Ec. 1.1}$$

En donde:

$I_w$  = Índice Wobbe (J/g °K)

$C_v$  = Capacidad calorífica a volumen constante (J/g °K)

$DR$  = Densidad relativa (adimensional)

Combinando de esta forma la  $C_v$  y la  $DR$  se obtiene un indicador de la forma en la que la energía es entregada al quemador, ya sea en una aplicación doméstica o en un motor de combustión interna de una automóvil.

En este sentido, el  $I_w$  debe de ser controlado para asegurar la combustión satisfactoria del gas en el quemador (Answer, 2009). Si no se cumple la especificación y se opera con un BGC o GNC con un  $I_w$  diferente al requerido o indicado, entonces la cantidad de aire que se mezcla con el gas

será incorrecta. Esto puede terminar por dañar el motor de combustión, debido a que cada uno de los equipos está diseñado para un intervalo específico del  $lw$  (Emerson, 2007). Además, dicho índice es empleado con el fin de comparar la energía producida por la combustión de diferentes gases con diferentes composiciones en los dispositivos de quemado. Por esto, este índice representa una forma de clasificar a los combustibles gaseosos ya que cada gas combustible tiene diferente  $lw$ . De esta forma, dos gases que tengan el mismo  $lw$ , producirán el mismo calor y trabajarán a la misma presión en el sistema de quemado (Bruijstens et al., 2008). Finalmente, las variaciones típicas que se toleran en el valor del  $lw$  son hasta del 5%, debido a que estas variaciones no son percibidas por el consumidor.

#### **2.3.4 Estándares de Gas Natural para homologación.**

Los combustibles utilizados en el proceso de homologación del desempeño de emisiones de los motores de vehículos ligeros y pesados se especifican de manera tal que el vehículo / motor sea capaz de mantener sus emisiones y durabilidad de desempeño sobre gases que probablemente sean encontrados a través del mercado de suministro de gas (NSCA, 2006).

Todos los combustibles cuando son quemados presentan una proporción ideal de aire:combustible. Por ejemplo, para la gasolina es de 14.7:1, mientras que para el gas metano es de 16.8:1 (Hofmann, 2004). Así, cuando un combustible es quemado en su proporción ideal, se dice que está operando con una  $\lambda = 1$ . Para nuestro caso, en el que no estamos operando con gas metano puro si no con GNC o BGC con una composición determinada de  $CH_4$ , el factor  $\lambda$  nos indica cuanto debe variar la proporción aire:combustible

para tener una combustión ideal con respecto al valor de  $\lambda$  del metano puro que es 1 (Bruijstens et al.,2008).

En el caso del gas natural, existen dos tipos de combustible: gas de alto poder calorífico (gas H) y el gas de bajo poder calorífico (gas L). Los gases naturales con un factor  $\lambda$  entre 0.89 y 1.08 son considerados que pertenecen al intervalo H, mientras que los gases con un factor  $\lambda$  entre 1.08 y 1.19 se consideran pertenecientes al intervalo L (Bruijstens et al., 2008). Así, se tiene que los combustibles de referencia utilizados para la homologación comprenden dos grupos de combustibles en los siguientes intervalos:

- La clase H, cuyos combustibles de referencia extremos son el GR y el G23.
- La clase L, cuyos combustibles de referencia extremos son el G23 y el G25.

Las características de los combustibles de referencia GR, G23 y el G25 se resumen en la Tabla 2.6. Las pruebas para los vehículos son llevadas a cabo sobre éstos combustibles de prueba con el fin de asegurar que los vehículos operen de forma adecuada sobre las composiciones típicas de gas que los consumidores podrían encontrar en las estaciones de suministro. En este sentido, los vehículos pesados pueden ser operados mediante pruebas sobre todos los tipos de combustibles que se encuentren en el intervalo del GR y el G25, o aprobados para una gama limitada de gases, ya sea del intervalo H o L. Los vehículos ligeros son probados para funcionar en toda la gama de gases y por lo tanto pueden operar con gases que tengan una calidad mínima equivalente a la del G25 y un gas con una calidad máxima equivalente a la del G20 (NSCA, 2006).

**Tabla 2.6 Estándares de gas para pruebas de emisiones sobre vehículos.**

Características	Unidades	G <sub>R</sub>	G <sub>23</sub>	G <sub>25</sub>	G <sub>20</sub>
Metano	% mol	87 ± 2	92.5 ± 1	86 ± 2	100
Etano	% mol	13 ± 2	---	---	---
N <sub>2</sub>	% mol	---	7.5 ± 1	14 ± 2	---
Azufre	mg/m <sup>3</sup>	10	10	10	10

Fuente:(NSCA, 2006)

**Tabla 2.7 Estándares de gas para pruebas de emisiones sobre vehículos.**

Calidad	Bajo	Medio	Alto	Máximo
Nombre de Referencia del Gas	G25	G23	G20	GR
Índice Wobbe	0.818	0.9	1	1.045
Factor Lambda	1.163	1.081	1	0.911

Fuente: (Bruijstens et al.,2008)

### 2.3.5 Métodos y estaciones de suministro de biogás.

Una vez que el biogás ha sido acondicionado, comprimido, enviado a la estación de suministro y que se ha dictaminado que dicho energético cumple con los parámetros anteriormente mencionados, entonces puede ser aplicado como combustible en transporte. En ese sentido, los vehículos de gas pueden ser abastecidos de combustible por medio de dos métodos básicos de alimentación de gas natural comprimido:

Llenado-Lento: Los sistemas de llenado lento, toman el gas directamente desde el compresor y lo llevan a los tanques de almacenamiento del vehículo. Por medio de este método, el tiempo de llenado para un vehículo

de servicio pesado puede ser como máximo de tres horas. Por lo tanto, estos sistemas sólo son adecuados cuando se dispone tiempo suficiente para el llenado, fuera de las horas de operación. Por ejemplo, operaciones nocturnas (CVTF, 2000).

Los sistemas de lento llenado no suelen ser muy aplicados debido al largo tiempo que implica el abastecimiento del combustible, y a que se requiere de un proceso de compresión adicional al que se le dio inicialmente al biogás cuando fue distribuido a la estación de suministro.

Rápido-llenado: Los sistemas de llenado rápido utilizan tanques de almacenamiento de combustible en cascada, que almacenan el combustible a una presión entre 200-250 bares y pueden abastecer de combustible a vehículos sobre el mismo tiempo o un poco más de lo normal que los vehículos convencionales abastecidos de combustible líquido (CVTF, 2000).

Como un ejemplo, en el Reino Unido los operadores de grandes flotas, y en particular los propietarios de vehículos pesados, por lo general tienden a tener sus propias instalaciones de suministro. Esto se debe a los descuentos que obtienen en el precio del gas por los grandes volúmenes de combustible que adquieren. Además, tienen sus propias instalaciones de mantenimiento y el control de sus equipos de alimentación de combustible y operaciones, lo que hace mucha más económico el sistema global de operación de los autos mediante biogás (NSCA, 2006).

Por otro lado, en lo que se refiere al gas natural licuado, éste requiere de un tipo completamente distinto de consideraciones y características de alimentación debido a que es un combustible líquido criogénico. Para convertir el gas natural o biogás acondicionado, a líquido, se enfría el gas hasta

aproximadamente  $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $112\text{ }^{\circ}\text{K}$ ), que es la temperatura a la cual el  $\text{CH}_4$  – componente principal de el biogás a condicionado - pasa a su estado líquido (Rivera, 2008). En caso de que se pretenda almacenar el biogás licuado in - situ, serán necesarios tanques de almacenamiento con aislamiento especial. En este caso, los autos podrán ser abastecidos sólo sobre la base de rápido llenado.

En comparación con las estaciones convencionales de suministro, el número de instalaciones capaces de abastecer vehículos de gas natural o gas natural licuado es muy limitado a nivel mundial. El Fideicomiso de Ahorro de Energía (The Energy Savings Trust) señala que hay un total de 622 estaciones de suministro de GNC (públicas y privadas) en Alemania y 521 en Italia, mientras que el Reino Unido cuenta con tan solo 31. Cabe señalar que en el caso del Reino Unido, cada una de estas estaciones está asociada a un operador de flotas, pero permiten el acceso a terceros (NSCA, 2006). Así mismo, Suecia que es el país con el mayor desarrollo en la tecnología de biogás en transporte cuenta con más 65 estaciones de suministro de dicho energético (biogasmx, 2009).

#### **2.4 Tecnologías involucradas en los autos limpios.**

El biogás y otros combustibles alternativos, permiten reducciones substanciales de emisiones de  $\text{CO}_2$  y otros contaminantes criterio. Este tipo de combustibles son llamados combustibles limpios - específicamente los que no contienen plomo y tienen un bajo nivel de azufre - debido a que, al disminuir de forma directa las emisiones de parte de los vehículos, hacen posible el uso de vehículos más limpios, y tecnología vehicular que disminuye aún más las

emisiones y la contaminación vehicular (SEMARNAT, 2009). Los combustibles libres de plomo y bajos en sus niveles de azufre, permiten el máximo nivel de reducción en emisiones contaminantes cuando se aúnan al uso de tecnología vehicular moderna, eficiente en su uso de combustible y con tecnología de control de emisiones. Así, los vehículos limpios son aquellos que incorporan lo último en tecnologías de combustión y control de emisiones. Dentro de esa categoría se encuentran los vehículos que obtienen su energía primordialmente del biogás o gas natural, los recientes sistemas híbridos, y otros combustibles alternativos (SEMARNAT, 2009).

Aunado a lo anterior, a nivel internacional se han desarrollado medidas y estrategias para inducir la reducción de emisiones vehiculares mediante la introducción o el reforzamiento de los estándares concernientes a la emisión de contaminantes específicos. La obligación de cumplir con estos estándares ha motivado a los fabricantes a incorporar tecnologías de control de emisiones, teniendo entre ellas la inclusión de factores de diseño en los motores como: mejor control en las tasas aire - combustible mediante inyección electrónica y control instantáneo computarizado, la tasa de compresión que mejora la eficiencia térmica provocando un menor consumo de combustible y un aumento en la potencia de los motores, así como la regulación de encendido (Ignition timing) que afecta la economía de combustible y las emisiones (SEMARNAT, 2009). Lo anterior, aunado a mejores regímenes de inspección y mantenimiento, y de gestión y planeación de la demanda de transporte, ha resultado en reducciones significativas en emisiones de contaminantes atmosféricos.

Paralelamente, existen otras tecnologías que dan soporte a los desarrollos anteriores, tales como los sistemas de diagnóstico a bordo, que permiten evaluar mediante sensores y dispositivos electrónicos el buen desempeño del motor y técnicas de tratamiento de los gases de escape o dispositivos de control de emisiones de post tratamiento para vehículos, entre los que se encuentran:

- Filtros de partículas diesel (Diesel Particulate Filters, DPFs).
- Catalizadores de oxidación diesel (Diesel Oxidation Catalyzers, DOCs).
- Absorbedores de NOx.
- Recirculación de gases de escape (Exhaust Gas Recirculation, EGR) que extrae una porción de los gases de escape y los usa para modificar el proceso de combustión mismo.
- Convertidores catalíticos de tres vías (MECA, 2009).

Todos los sistemas antes mencionados, fueron desarrollados tomando en cuenta la importancia y el efecto que los combustibles y vehículos limpios tienen sobre el medio ambiente y sobre la salud pública. Esto, tomando en cuenta que la contaminación del aire urbano – generada principalmente por el transporte - es la principal causante de la muerte de cerca de 800,000 personas por año según cifras de la Organización Mundial de la Salud. Lo anterior representa un gran problema, debido a que actualmente circulan en las ciudades del mundo alrededor de 1 billón de automóviles, con una tendencia a seguir aumentando. Además de los efectos locales, los vehículos también contribuyen a las emisiones globales de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, así como a las emisiones ácidas de SOx cuyos daños se reflejan en la cubierta vegetal,



rendimiento de las cosechas, afectación de ecosistemas acuáticos y arquitectura urbana (SEMARNAT, 2009).

El biogás es caracterizado como un combustible limpio por sus bajos niveles de emisiones que genera al ser quemado. Dicho energético puede ser aplicado como combustible en transporte, implementándolo en los autos comerciales de gas natural comprimido (GNC), sin que éstos sufran modificación alguna. Esto se debe a que los autos que usan BGC como combustible emplean exactamente el mismo motor correspondiente a la operación con GNC. En este sentido, alrededor de todo el mundo existen casi 10 millones de autos de GNC, pero de esos 10 millones, en México sólo existían 3,037 autos a gas para el 2004. Esta es una cifra prácticamente despreciable si tomamos en cuenta que para el mismo año, en México se contaba con una matrícula de 15,828,921 autos convencionales. Así mismo, el número de estaciones de suministro de GNC en nuestro país es mínimo, contándose con un total de 3, en comparación con el total que hay en el mundo que es de 15,776 (NVGA, 2009).

A pesar de que el biogás es un combustible limpio, que al ser quemado reduce considerablemente las emisiones de contaminantes atmosféricos y de GEI en comparación con los combustibles fósiles (ver Anexo 1), la tecnología de aplicación en transporte de este energético prácticamente no existe en nuestro país. Este es gran problema, debido a que para el 2006 el GNC costaba 62% menos que la gasolina Premium y 40% menos que el diesel. Esto nos dice que sería coherente que en nuestro país existiera un mayor impulso a este combustible en transporte como pasa en Argentina. En aquel país se tiene

una situación similar en términos de precio, pero se cuenta con la mayor infraestructura a nivel mundial en lo que respecta a autos de gas.

A continuación se estudian las dos categorías principales de autos a gas que existen en el mercado. Esto con el fin de generar una idea de la diversidad de autos de gas que se encuentran en el mercado y de su principio de operación.

#### **2.4.1 Vehículos de servicio ligero.**

Generalmente, los vehículos de servicio ligero (*Light-duty*) alimentados por GNC o BGC están equipados con motores de encendido por chispa, que operan con proporciones estequiométricas aire:combustible, y que cuentan con un convertidor catalítico de tres vías. En la mayoría de los casos, estos vehículos son del tipo "bicomcombustible" ("bi-fuel"), caracterizándose por contener un sistema de gasolina, junto con uno de gas que puede ser BGC o GNC. Lo anterior permite que el vehículo opere por medio de cualquiera de los dos combustibles, ya sea gasolina o gas, según lo requieran las circunstancias. Sin embargo, en algunos casos, el vehículo es diseñado para operar exclusivamente con gas natural o biogás y su proceso de operación es optimizado para operar mediante este único combustible (NSCA, 2006).

#### **2.4.2 Vehículos de servicio pesado.**

El caso de los automóviles de servicio pesado (*heavy-duty*) es un poco diferente. En este caso se encuentran disponibles en el mercado autos con motores de quema pobre y motores estequiométricos de encendido por chispa. Estos motores se basan en grandes motores diesel, que operan más mediante el sistema de encendido por chispa que por el sistema de encendido por

compresión. En este caso, los motores no se derivan de motores de gasolina (*petrol-engines*) y son siempre diseñados para operar exclusivamente con gas. Una ventaja significativa que presentan este tipo de automóviles es que suelen ser hasta un 50% más silenciosos que sus equivalentes de diesel (NSCA, 2006).

En los últimos años se ha dado un pequeño desarrollo a la sustitución de diesel por combustibles gaseosos, como el GN y el GLP en el sector transporte. Dicho desarrollo ha impulsado la venta de tecnologías llamadas “sistemas de doble combustible” (“dual fuel”) que emplean diesel como piloto de encendido y un energético gaseoso como combustible principal de operación. De esta forma, altas tasas de sustitución de GNC por diesel han sido operadas, a veces hasta un 90%. Sin embargo, un promedio de 70% es representativo de la experiencia internacional (NSCA, 2006). Este sistema permite a un vehículo operar con los beneficios de bajas emisiones de GNC / BGC, manteniendo al mismo tiempo el poder inherente, la eficiencia y la larga vida de motores de encendido por compresión (motores a diesel convencionales).

### **3. ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE EMPLEO DE BIOGÁS EN TRANSPORTE.**

Una vez que han sido descritas las tecnologías de aplicación del BGC en transporte, lo más coherente es hacer una revisión del estado del arte de dicha tecnología a nivel mundial. Esto con el fin de conocer cuáles son los factores que determinan la adopción de dicha tecnología.

#### **3.1 Principales países productores de biogás.**

El desarrollo del sistema de producción, distribución y empleo del biogás en transporte sólo se ha dado en pocos países de la Unión Europea. Esto no significa que los países que no han desarrollado el sistema no sean productores de biogás a escala industrial. Al contrario, países como el Reino Unido y Alemania que son los principales productores, tienen prácticamente inexplorada dicha tecnología.

A continuación se explora el estado del arte en cuanto a producción de biogás se prefiere, primero para toda la UE y después para otros países que prácticamente no han explorado la posibilidad de empleo del biogás en transporte.

##### **3.1.1 Unión Europea.**

En la Unión Europea una tercera parte de la producción de biogás proviene de la digestión de los lodos de de las plantas de tratamiento de aguas residuales (NSCA, 2006). El empleo de biogás producido a partir de este tipo de plantas es una práctica común aplicada a gran escala en muchos países de la Unión Europea, principalmente en Suecia y en el Reino Unido. Así mismo, la colección y utilización de los gases ricos en CH<sub>4</sub> provenientes de los

vertederos, es una práctica ampliamente aplicada en la UE. Del total de biogás generado, casi el 40% proviene de los vertederos (Murphy et al., 2006). Lo anterior se deba a que a nivel mundial, las estrictas legislaciones concernientes a las emisiones de CH<sub>4</sub> a partir de vertederos han aumentado, lo que incrementa los incentivos para la utilización del biogás generado a partir de éste tipo de sitios. Al mismo tiempo, existe un decline gradual en el envío de la materia orgánica a los vertederos que genera efectos contrarios en la perspectiva de largo plazo de la colección y empleo de los gases de vertedero. Esto se debe, de igual forma, a la normatividad reciente aplicada generalmente a los países del primer mundo, tal como la Directiva de Vertederos de la UE (EU Landfil Directive). Dicha normatividad impone restricciones para los desechos orgánicos que son enviados a los vertederos (NSCA, 2006).

Por otro lado, la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) es considerada una materia prima de buena calidad para la producción de biogás gracias a los altos rendimientos de producción que se obtienen mediante este tipo de materia. El problema respecto a la FORSU es la poca difusión que se le ha dado como potencialmente generadora de biogás, teniendo que sólo un 2 % del total de la producción europea viene de éste tipo de desechos (Murphy et al., 2006).

Hoy en día, existen más de 4,500 plantas de producción de BG en toda la Unión Europea, incluyendo un gran número de sitios de vertedero. La estimación de producción de energía a partir del biogás fue de 92 PJ en el año 2007 y se tiene estimado un potencial total para la Unión Europea de 770 PJ / año para el 2020 (Braun, 2005). En esta región del mundo, los dos países que cuentan con la mayor tasa de producción en biogás son Alemania e Inglaterra.

Pero en lo que respecta a la producción per cápita, los países con las tasas más altas son el Reino Unido, Suecia, Dinamarca, Suiza, y los Países Bajos (Murphy et al., 2006).

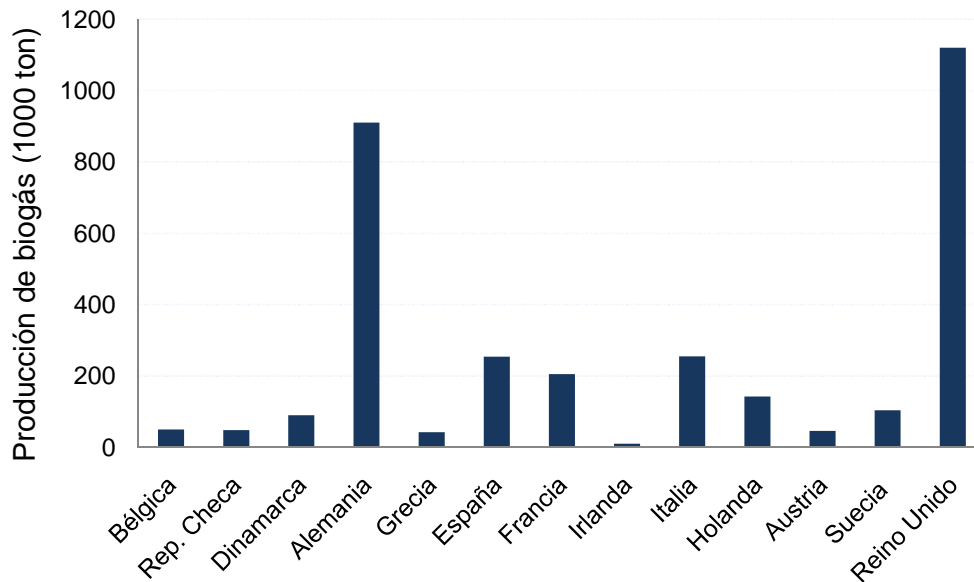
### **3.1.2 Reino Unido.**

El Reino Unido es uno de los mayores productores de biogás a nivel mundial (Figura 3.1). En este país, el biogás se ha generado primordialmente a partir de los lodos de aguas residuales, pero el desarrollo que se ha dado en los últimos 10 años en la captura del biogás de vertedero ha llevado a que ésta sea la principal fuente de biogás (NSCA, 2006). El biogás generado por cualquiera de las dos vías mencionadas, es generalmente empleado para la producción de calor y energía eléctrica, mientras que a la fecha, se ha realizado muy poca exploración acerca del mercado de biogás para fines de transporte.

Por otro lado, el proceso de DA en el tratamiento de desechos agrícolas y de alimentos, ha sido prácticamente ignorado en el Reino Unido, existiendo sólo un puñado de plantas que han sido construidas para estos propósitos. Probablemente los dos ejemplos más conocidos son las plantas de Holsworthy en Devon, y la planta de de South Shropshire en Greenfinch. La primera planta fue construida en el año de 1992, con una escala de producción de 4,000,000 de m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por año, y la segunda fue construida en el año de 1998, con una escala de producción de aproximadamente 140m<sup>3</sup> de biogás por hora por tonelada de material de desecho (NSCA, 2006). Por otro lado, en Alemania, Austria y Dinamarca hay varios cientos de plantas a escala granja. Además, se está generando un crecimiento notable en el número de plantas centralizadas

de escala mayor que son alimentadas con desechos agrícolas, desechos alimenticios y lodos de aguas residuales. En dichas plantas, el biogás generado es empleado para generar calor, energía eléctrica y combustible para transporte.

**Figura 3.1 Principales países productores de biogás en el Reino Unido para el año 2003 (NSCA, 2006).**



### 3.1.3 Alemania

Alemania es el segundo país productor de biogás en la UE. En este país, la mayor parte de la producción del energético es generada a partir de los desechos generados en granjas. Para el 2002, existían al menos 1600 plantas agrícolas descentralizadas productoras de biogás (Fischer et al., 2002). Las condiciones ideales para el desarrollo de de este tipo de plantas en este país se desarrollaron gracias a la generación de programas y leyes. Así, en septiembre del 2001 la Asociación Alemana de Biogás estimó que el potencial total de sustitución del biogás en la demanda total de GN en aquel país era del 20 – 30 % (Alexandesson, 2003).

### **3.2 Principales países y ciudades en el empleo de biogás como combustible en transporte.**

Suecia es el país que mayor desarrollo ha tenido en los procesos y tecnologías de producción y tratamiento del BG como combustible para aplicación en el sector transporte. Este es el país con el mayor número de autos de BGC y el que cuenta con el mayor número de estaciones de suministro de este combustible.

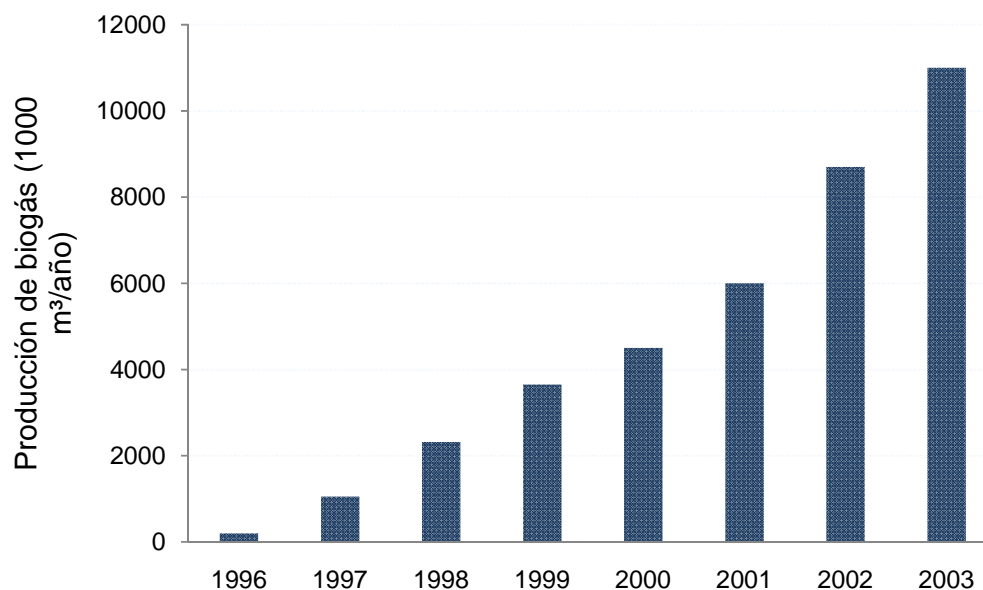
A igual que Suecia, existen otros países y ciudades de la Unión Europea que se han encargado de dar desarrollo al empleo de BG como combustible en transporte. Con el fin de darnos una idea del desarrollo y la situación actual de este tipo de tecnología, se estudia a continuación el estado del arte de dichos países.

#### **3.2.1 Suecia.**

Toda la experiencia generada en Suecia puede ser vista como el camino a seguir por aquellos países que deseen desarrollar la tecnología del BG para transporte. En dicho país, el desarrollo del BG en el sector transporte se dio inicialmente el año de 1996 y a la fecha sigue siendo éste, el país con la mayor infraestructura en este rubro a nivel mundial. Desde 1996, el uso de BG en transporte ha ido incrementándose de forma sustancial (Figura 3.2). Hoy en día, más de 14,500 vehículos son impulsados por medio de dicho energético y se tiene proyectado que para finales del año en curso sean 16,000 los vehículos impulsados por BGC, incluyendo 300 autobuses y 200 vehículos pesados de distribución (Biogasmax, 2009).



**Figura 3.2 Producción de biogás para uso en transporte.**



En Suecia, casi 44 millones de m<sup>3</sup>N de gas para vehículos fueron vendidos en el 2005. Esto es el equivalente a casi 50 millones de litros de gasolina, o el equivalente a 1.3 TWh<sup>2</sup> de energía. Toda esta energía fue producida por medio de la operación de 233 plantas de BG, de las cuales, 139 fueron plantas municipales de tratamiento de aguas, 70 plantas de generación a partir de vertederos, 13 plantas de tratamiento de aguas industriales de desecho, 4 plantas centralizadas y 7 plantas en granja (Pettersson, 2007). Todas estas plantas están ubicadas mayoritariamente en las nueve ciudades productoras de biogás con fines de aplicación en transporte que son: Eslöv, Stockholm, Trollätthan, Uppsala, Helsingborg, Göteborg, Linköping, Kalmar, Jönköping and Kristianstad (Alexandersson, 2003).

Todo el BG producido a partir de estas plantas ha generado un desarrollo en la aplicación del mismo para transporte. Desarrollo que ha sido a su vez resultado de circunstancias específicas de suministro y demanda de

<sup>2</sup> 1TWh = 1tera watt = 10<sup>12</sup> watts hora

energía. Dichas circunstancias se basan en un exceso de producción de biogás por parte de las plantas existentes - principalmente en sus plantas de tratamiento de aguas residuales - y en un bajo precio de venta de la energía eléctrica. Lo anterior fuerza a los productores de biogás a buscar otra opción en el mercado que no sea la producción de energía eléctrica, resultando ser un mercado potencial para el biogás acondicionado la opción de empleo en transporte (NSCA, 2006).

Con el fin de continuar con el impulso del biogás aplicado a transporte, todas las plantas de biogás en Suecia que se encuentran en la fase de planeación o construcción, estarán equipadas con la infraestructura necesaria que permita ofrecer BG acondicionado a la calidad del GN, tanto para uso directo como un combustible para transporte como para la inyección dentro de la red de gas natural (NSCA, 2006).

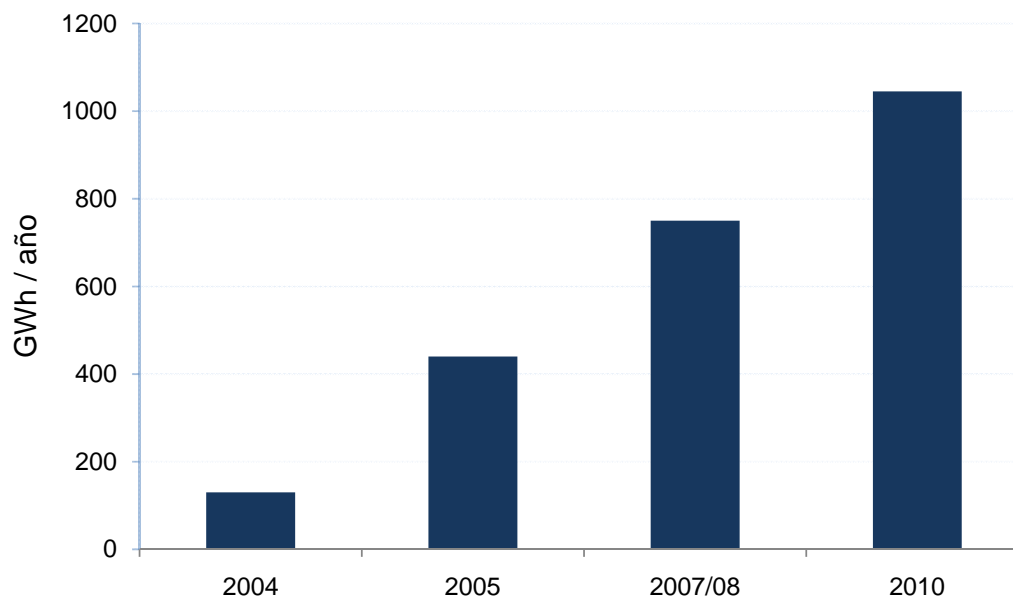
Además, tomando en cuenta que el BG es visto como un combustible relativamente nuevo, y que los autos de gas son más caros, los gobiernos de muchas ciudades suecas están promoviendo el uso de BGC en autos privados a través de una gama de incentivos que incluyen (Persson, 2007):

- Estacionamiento gratis en muchas ciudades.
- Bajos impuestos sobre vehículos de BGC cuando son usados en tráfico comercial.
- Exención de un porcentaje considerable de impuestos al BGC como combustible para transporte, eliminándose todos los impuestos menos el IVA.

- El precio del biogás es de 20 a 30 % menor que el de la gasolina.
- Exención de pago de cuota de caseta a autos de biogás para entrar a la ciudad.
- Carriles especiales para taxis de biogás.
- Soporte financiero para investigación en vehículos de biogás.
- A nivel nacional, las empresas reducen sus impuestos en un 40% cuando los vehículos de gas son elegidos por sus empleados.

Todos los incentivos anteriores representan grandes beneficios para los operadores, los cuales han dado pie a un clima muy positivo para el desarrollo del sector de transporte a base de biogás. Esto ha dado como resultado que cerca del 15% de los Volvo de servicio pesado que se venden en el mercado sean vehículos bi-combustible de biogás. Así mismo, como una muestra del crecimiento en el empleo de este tipo de autos, para el 2004 sólo se contaba con poco más de 4,000 vehículos de gas (Jhönson, et al., 2003), mientras que para el 2007, la cifra aumentó a 12,333 (Petersson, 2007). En la Figura 3.3 y Tabla 3.1 (a), 3.1 (b) y 3.1 (c) se puede notar fácilmente este crecimiento. Por ejemplo, en tan sólo 5 años se pasó de un total de 44 autos de gas a 1,725 (Atrax Energy, 2005), y se proyecta que del 2004 al 2010 el volumen de biogás vendido para transporte pase de 126GWh a 1,040 GWh (Linnè et al., 2004).

**Figura 3.3 Producción de biogás para transporte en términos de GWh (Rietz, 2005).**



De acuerdo con lo anterior, queda claro que el crecimiento que se ha dado en Suecia en lo que respecta al empleo de biogás en transporte no es más que el resultado del compromiso por parte de todos los sectores involucrados. Compromiso que tiene el fin de sustituir gradualmente a los combustibles fósiles por una fuente renovable en transporte.

**Tabla 3.1 (a) Número de vehículos de biogás en Suecia.**

Año	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Vehículos Ligeros	20	35	395	759	1008	1292
Vehículos Pesados	0	18	35	55	84	103
Autobuses	24	151	227	265	282	330
Total	44	204	657	1079	1374	1725

Fuente: (Atrax Energy, 2005)

**Tabla 3.1 (b) Número de estaciones de suministro en Suecia.**

Año	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Públicas	1	3	7	12	15	18
Autobuses	1	5	7	7	7	8
Total	2	8	14	19	22	26

Fuente: (Atrax Energy, 2005)

**Tabla 3.1 (c) Volumen de biogás vendido en Suecia (kNm<sup>3</sup>).**

Año	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Gas Natural	986	4213	6017	7086	7552	9010
Biogás	0	95	1120	2776	3783	4940
Total	986	4308	7137	9862	11335	13950

Fuente: (Atrax Energy, 2005)

Aparte de las ciudades suecas productoras de biogás mencionadas anteriormente, existen otras ciudades de otros países de la Unión Europea que de igual forma producen el energético con fines de aplicación en transporte. En la Tabla 3.2 se muestran las cifras de generación de biogás acondicionado para transporte por parte de las principales ciudades productoras a nivel mundial, así como el número de autos de biogás con los que cuentan. Como se puede notar, la mayor parte de las ciudades mostradas en la tabla son ciudades suecas, lo que lo confirma como el país más avanzado en éste tipo de tecnología.

### 3.2.1.1 Estocolmo

Como parte del desarrollo del BG en Estocolmo, cuatro estaciones de suministro de dicho combustible fueron construidas en el distrito de negocios de la ciudad. Tres de las estaciones fueron construidas por la compañía AGA

Gas AB, y una por Statoil (Alexanderson, 2009). Por medio de estas estaciones, alrededor de 8 millones de m<sup>3</sup>N de BG por año serán entregados. Además, una nueva red de al menos 10 estaciones más está en fase de planificación. La extensión de la red servirá a más de 1,000 vehículos de biogás que operan en la ciudad (NSCA, 2006).

**Tabla 3.2 Principales ciudades del mundo en aplicación del biogás en transporte.**

Ciudad	País	Producción anual (Mm <sup>3</sup> )	Autos Ligeros	Autos Pesados
Estocolmo	Suecia	3.5	425	---
Lille	Francia	1	---	170
Eslöv	Suecia	0.2	50	4
Trollhättan	Suecia	0.8	215	28
Linköping	Suecia	3	360	68
Jönköping	Suecia	0.15	92	---
Kristianstad	Suecia	1.5	95	24
Uppsala	Suecia	---	----	46
Helsingborg	Suecia	---	----	50
Göteborg	Suecia	0.45	1,490	----
Zurich	Suiza	----	600	9

Fuente: (Alexandesrsson, 2003)

El BG empleado en esta ciudad se genera a partir de la planta local de tratamiento de aguas residuales que genera alrededor de 3,500,000 m<sup>3</sup> de biogás mediante el tratamiento de aproximadamente 50,000,000 m<sup>3</sup> / año de aguas residuales (Alexandesrsson, 2003).

### **3.2.1.2 Linkoping.**

Linkoping es la quinta ciudad más grande en Suecia con una población de 130,000 habitantes. Esta ciudad se vio obligada a establecer programas de gestión del tráfico en el centro de la ciudad, así como programas de transporte público con el fin de reducir la contaminación atmosférica de la ciudad (Alexandersson, 2003). A pesar de este tipo de medidas, la calidad del aire continuó siendo muy pobre en muchas de las localidades de esta área. Con el fin de dar solución a este problema, el gobierno echó a andar un programa consistente en la operación de una flota de 20 autobuses operada mediante BGC. Para 1998 la flota total de autos de BGC era de 60 autobuses urbanos y 80 vehículos ligeros y dicha flota creció para el 2006 a 68 autobuses y 360 autos de biogás.

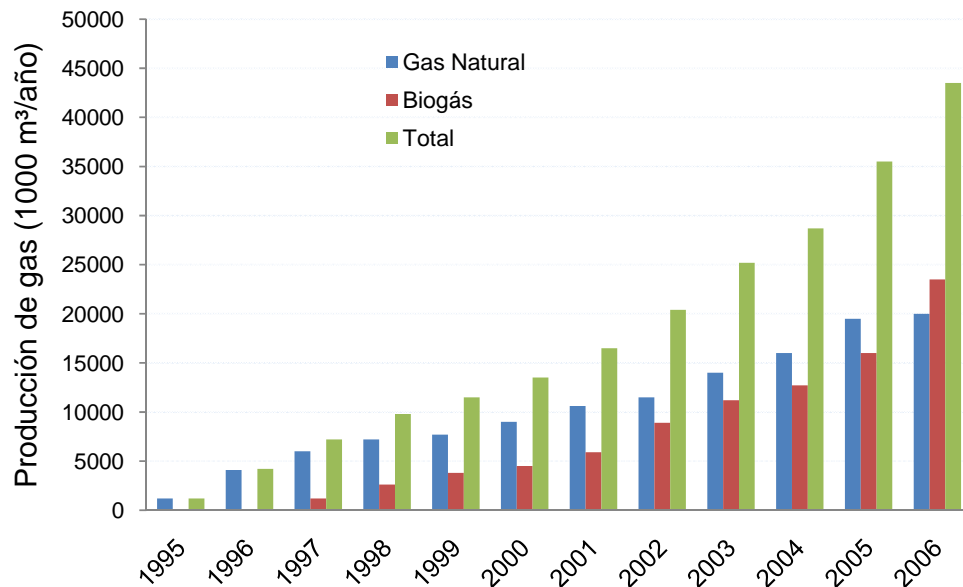
El BGC necesario para la operación de la flota se genera a partir de una planta que trata desechos azules y desechos rojos. Los desechos rojos consisten principalmente en desechos peligrosos derivados de los mataderos, mientras que los desechos azules consisten en sangre, estómagos e intestinos de ganado. Estos desechos son presurizados antes de que se lleve a cabo la digestión (Alexandersson, 2003). La planta de generación de BG trata 99,000 tpa de este tipo de desechos, y el BG producido es acondicionado y enviado a un depósito de combustible donde es usado para abastecer de combustible a la flota total de autos de BG de la ciudad. De esta forma, el BG sustituye 2,000,000 L de diesel cada año (Murphy., 2006).

### 3.2.1.3 Gas natural y biogás en Suecia.

En Suecia el desarrollo de las flotas de vehículos que operan a partir de biogás se está dando por medio de una estrecha colaboración entre los distribuidores de GNC y de BGC. De forma reciente en algunas ciudades del sur de Suecia el sistema de distribución de GNC ha sido transformado, abasteciendo un combustible formado por la combinación de GNC y BGC para la red de distribución al transporte (Alexandersson, 2003). En este sentido, el impuesto sobre BGC como combustible para vehículos es bastante bajo con el fin de lograr un éxito comercial en el mercado (Eliasson, 2005).

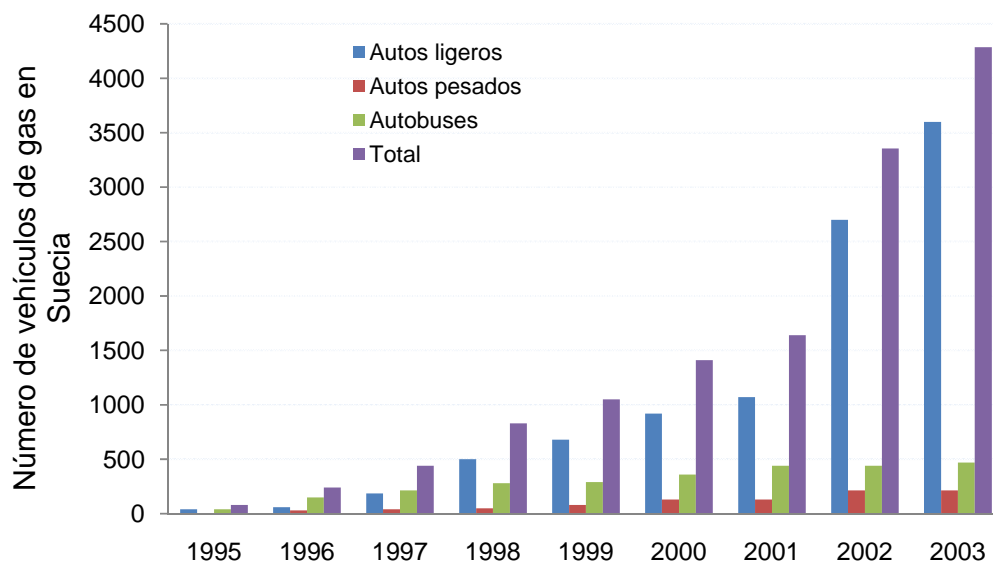
Los autos de gas en Suecia son impulsados tanto por GNC como por BGC, pero la tasa de crecimiento del BGC sobre el GNC ha aumentado de forma considerable en los últimos años. Tendiendo que para el año 2006 la cantidad de BGC en el volumen total de gas vendido fue de más del 54 %, superando así al GNC en ventas (Figura 3.4) (Eliasson, 2005).

**Figura 3.4 Distribución de biogás / gas natural como combustible en transporte en Suecia 1995-2003 (Petersson, 2007).**





**Figura 3.5 Desarrollo de vehículos de gas en Suecia 1995-2003 (Eliasson, 2005).**



El uso de BGC como combustible en vehículos conlleva a muchos beneficios en Suecia, los cuales se mencionaron ya anteriormente. Dichos beneficios en conjunto, han creado un clima idóneo para el desarrollo del BGC en el sector automovilístico. En la Figura 3.5 se muestra la distribución de autos que funcionan con BGC o GNC y el aumento en el uso de éste tipo de autos a través de los años hasta el 2006, el cuál ha sido más que pronunciado.

### **3.2.2 Francia.**

En 1990, el gobierno de la ciudad de Lille en Francia decidió comenzar un servicio urbano de autobuses abastecidos por GN o por BG acondicionado producido a partir de la digestión de los lodos generados en una planta local de tratamiento de aguas residuales. Este fue el primer proyecto de este tipo, en el que el primer autobús de BGC fue introducido en Marzo de 1994, el segundo en Septiembre de 1997 y otros 6 a finales de 1998 (Alexandersson, 2003).

Después de un periodo de prueba exitoso, se decidió introducir una nueva flota de autobuses de este tipo dentro del servicio total. El objetivo final del proyecto es reemplazar la flota total de 400 autobuses, por lo que a finales del año 2005 la ciudad de Lille (NSCA, 2006):

- Adquirió 128 autobuses de gas / biogás, operando una flota total de 170 autobuses de gas / biogás
- Adquirió una nueva estación de compresión de BG y GNC para los autobuses
- Construyó un nuevo depósito de autobuses y modificó las características de los otros depósitos (mediante detectores de gases, sistemas de ventilación, e iluminación). Esto con el fin de garantizar la operación de los autobuses y el mantenimiento seguro

Cabe señalar que la estación de compresión de Lille es dual, es decir, es capaz de abastecer GNC y BGC. Esto le permite hacer frente a las fluctuaciones en la producción de biogás, manteniendo un suministro suficiente para el servicio y operación de la flota de autobuses. El costo total de la operación por kilómetro para autobuses de biogás es equivalente a los costos con la operación por medio de combustibles fósiles, mientras que el costo de BGC similar a la del GNC (NSCA, 2006).

El éxito en Lille ha alentado a las autoridades de transporte público a seguir invirtiendo en los autobuses de BGC con el objetivo de convertir la totalidad de su flota a autobuses de BGC para el año 2015. De igual forma, el éxito obtenido ha alentado al gobierno a la construcción de nuevas estaciones

de suministro con el fin de satisfacer la demanda de suministro suficiente para la flota (NSCA, 2006).

### **3.2.3 Suiza.**

Suiza es otro país en donde se ha dado un desarrollo en el sector del BG para transporte. En este país, entre 750 y 800 autos de BGC se encuentran actualmente en operación (NSCA, 2006), contando con una red de 100 estaciones de suministro localizadas a lo largo y ancho de Suiza (Alexandersson, 2003). De esta forma, el BG es promovido en dicho país a través de una amplia variedad de medidas impulsadas por el sector público y privado, entre las cuales se encuentran:

- Exención de impuestos al combustible
- Las nuevas estaciones de suministro reciben apoyo financiero de la fundación de la industria del gas
- Existe una campaña de promoción para los proveedores de gas y otros asociados

Como resultado de la exención de impuestos, actualmente el BGC puede ser vendido a un precio 45% menor que la gasolina en las estaciones de suministro (el biogás tiene un costo aproximado de 0.63 €/litro para un volumen equivalente en gasolina, comparado con un 0.95 €/litro para la gasolina). Esto le da un aceptable retorno de la inversión con respecto a la inversión adicional necesaria para la compra del vehículo de gas que es de alrededor de 3,000 francos suizos (NSCA, 2006).

### **3.3 Experiencia internacional en diferentes categorías de autos operados mediante GNC.**

Una vez que se ha hablado acerca de la experiencia generada por la aplicación de BG en transporte por parte de las ciudades más avanzadas en este rubro, es necesario hacer una revisión de las experiencias generadas por la operación de las diferentes categorías de autos de gas.

Según cifras de la Asociación Europea de Vehículos de Gas Natural (NGVA, 2006) para el año 2006 existían más de 5 millones de vehículos de gas natural en uso alrededor del mundo. De los cuales 1.4 millones de vehículos se encuentran en Argentina, y alrededor de un millón de vehículos en Brasil. En lo que respecta a la Unión Europea, la flota italiana de 380,000 NGVs es por mucho la más grande, seguida por Alemania con 38,000, Suecia con 14,500 y Francia con 8,000 (NSCA, 2006). Por otro lado, en lo que respecta a vehículos de GNC pertenecientes al Sector Público, es España el país que cuenta con el mayor número de vehículos. Este país cuenta con más de 500 autos en operación en la ciudad de Madrid, incluyendo autobuses y vehículos de recolección de desechos (NSCA, 2006).

El hecho de que en algunos países de la Unión Europea se hayan logrado resultados positivos con el empleo de GNC / BGC como combustible para transporte, se debe a la construcción de una amplia infraestructura de suministro de combustible y proveedores activos de vehículos en el mercado con opciones de gas. Además, el GNC / BGC ha demostrado ser un combustible popular para camionetas, autobuses y vehículos grandes en estos países, en donde se cuenta incentivos fiscales específicos a favor de estos combustibles.

Por otro lado, así como han existido muchos éxitos en lo que respecta a la aplicación de este combustible en transporte, también han habido fracasos. El análisis de estos casos de éxito y de fracaso no es útil para determinar cuáles son los factores a tomar en cuenta en la correcta aplicación de esta tecnología.

### **3.3.1 Fracasos en la aplicación de biogás en transporte.**

En la Tabla 3.2 se muestran las principales ciudades productoras de biogás para aplicación en transporte, todas estas ciudades comenzaron implementando esta tecnología a principios y mediados de los 90's y aún continúan operando con éxito. En contraste con dichas ciudades exitosas en la aplicación del BG en transporte, existen algunos fracasos en la aplicación de esta tecnología en otras ciudades, los cuales se resumen a continuación.

#### Cahmberry.

En 1994, el gobierno de la ciudad de Chambéry en Francia decidió acondicionar el biogás producido a partir de su planta de tratamiento de aguas residuales con el fin de abastecer de combustible a una flota local de 15 autos. Una empresa privada invirtió en la tecnología de producción esperando obtener ganancias por la venta del BG acondicionado. El proyecto finalmente colapsó después de dos años debido a que la planta tuvo fallas técnicas generadas gracias a malas posturas por parte de los inversores. Las malas posturas fueron generadas por las ambiciones de los inversores, los cuales pretendían ahorrar dinero en la inversión técnica, generando un bajo nivel de tecnología (tanques de acero negro, compresor inadecuado, ausencia de control de

calidad del gas, ausencia de sistema de alerta) (Alexandesrsson, 2003). De esta forma, el seguimiento financiero del proyecto desapareció gracias a los bajos ingresos obtenidos que desestabilizaron a los inversores.

### Christchurch.

En la década de los 80's, con el fin de abastecer de BGC a la flota municipal de 70 vehículos ligeros, se decidió acondicionar el biogás producido a partir de la planta de tratamiento de aguas residuales. De esta forma, los vehículos fueron convertidos a vehículos de gas y se obtuvieron ganancias de 140,000 \$NZ por año (Alexandesrsson, 2003).

Este proyecto concluyó en 1994, cuando el gobierno de la ciudad decidió emplear parte del BG para la generación de energía eléctrica. Esta decisión fue tomada mientras el gobierno también decidió fijar el precio del diesel al mismo nivel del BGC. Así, el consumo del BGC se colapsó debido a un precio muy bajo del diesel con el que el BGC no podría competir y a la falta de una estación de suministro.

### Tours.

Tours es una ciudad francesa de 300,000 habitantes, en la que, en los años 90's el Departamento de Transporte de la ciudad, en colaboración con una planta de tratamiento de aguas residuales decidió transformar el 14% de su producción de BG en combustible para vehículos. Ellos convirtieron 30 vehículos convencionales (camiones y automóviles) en motores bi-combustible. El proyecto fracasó rápidamente debido a la falta de apoyo por parte de las autoridades locales, esto debido a que no era sólo una cuestión de dinero sino

también una cuestión de motivación real acerca de esta nueva idea (la primera en Francia) (Alexandersson, 2003).

### **3.3.2 Éxitos en la aplicación de biogás en transporte.**

Para la mayoría de los proyectos exitosos concernientes a la aplicación del biogás en transporte, el éxito es medido en términos de impacto ambiental, beneficios a los habitantes de las ciudades en donde la tecnología se aplica y la viabilidad económica de los proyectos.

#### **3.3.2.1 Impacto ambiental.**

Mediante la comparación entre las emisiones generadas por la combustión del biogás contra las que generan los combustibles fósiles, se ha llegado a la conclusión de que el biogás presenta menores emisiones de gases contaminantes que los combustibles fósiles. Así, el objetivo de esta tesis, es determinar de forma experimental el porcentaje de reducción en emisiones de gases criterio (NO<sub>x</sub>, HC y CO), gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>) y material particulado (PM<sub>10</sub>)

Además, el impacto global que se genera por el sistema de producción de biogás (proceso de digestión anaerobia), es potencialmente benéfico para el ambiente (ver Anexo 1). Esto se debe a que por medio de dicho proceso se le da un tratamiento a los desechos orgánicos, produciéndose un bio - fertilizante y un energético de un alto valor energético que puede ser usado en el motor de combustión interna de un auto como lo es el biogás.

### **3.3.2.2 Impacto sobre los clientes.**

Por medio de información que se ha obtenido por parte de algunos conductores y ciudadanos en las ciudades de Lille y Estocolmo se notifica lo siguiente (Alexandersson, 2003):

- Se obtiene una reducción en el ruido por medio de la operación en BGC (conductores y ciudadanos).
- Una conducción más suave (conductores).
- Una reducción en las emisiones que presentan olor (ciudadanos).
- El 96% de los ciudadanos que condujeron un auto de biogás quedaron totalmente satisfechos con el desempeño.
- Las dos terceras partes de la población de Estocolmo que condujo un auto a gas está consciente de que se tienen que pagar alrededor de 20,000 SEK<sup>3</sup> más para adquirir un auto de biogás.

### **3.3.2.3 Viabilidad económica.**

La cuestión económica es el punto débil en lo que respecta al desarrollo de los autos de biogás. Cuando se invierte en una tecnología de biogás aplicado a transporte, los autos a gas son en promedio 40% más caros que los autos convencionales. En el caso de México, el GNC es 33% más barato que el diesel. Por lo tanto, si el biogás fuera vendido al precio del GNC, entonces se obtendrían ahorros considerables. El problema es que estos ahorros en combustible no compensan el costo extra del auto a gas (ver Anexo 3). Sin

---

<sup>3</sup> SEK es el acrónimo utilizado para definir a la corona sueca. Este es el tipo de moneda utilizado en Suecia. Para el año en el que se publicó el artículo, es decir, en el 2003, 1 SEK era igual a 1.34 Pesos mexicanos. Para el 20 de mayo del 2010 1 SEK era igual a 1.63 Pesos mexicanos.



embargo, todos los proyectos presentados anteriormente (Tabla 3.2) son económicamente viables, debido principalmente a las siguientes razones (Alexandersson, 2003):

- Los efectos de escala (determinación del umbral de flujo, ya se contaba con un adecuado funcionamiento de la planta de biogás).
- Corta distancia entre el lugar de producción del biogás acondicionado y la estación de suministro de combustible.
- Políticas favorables para la aplicación del biogás en transporte (reducción del IVA, no impuestos extras, etc.).
- Políticas favorables para la producción de biocombustibles.
- En Suecia: subsidios por kilómetro en función del combustible utilizado.
- Beneficios en materia de fiscalidad ambiental.
- Los precios de venta del biogás son menores que los correspondientes al diesel.
- Los subsidios de estacionamiento en algunas ciudades (impacto importante en el usuario que prefiere acciones directas para ahorrar dinero).

### **3.3.3 Experiencia en aplicación de la tecnología en autobuses**

La experiencia internacional en lo que respecta al uso de autobuses de GNC ha demostrado que sólo las flotas que operan con un número suficiente de unidades de GNC, para soportar y desarrollar la infraestructura necesaria tanto en el mantenimiento como en suministro de combustible, son las que han tenido el mayor éxito. La Tabla 3.3 enlista breves detalles sobre pruebas de

campo que involucran la operación de autobuses con GNC en el Reino Unido. Muchas de estas operaciones de autobuses fueron conducidas durante los 90s y muchas ya han cesado, ya sea debido a dificultades técnicas o a las adversidades económicas de la operación de vehículos de gas natural.

En este sentido, se llevó a cabo un proyecto por parte de la Comisión Europea, llamado Júpiter-2. Dicho proyecto se basa en la experiencia de operación de cuatro autobuses GNC en rutas de aparcamiento y corriendo en la Ciudad de Southport en Inglaterra. El objetivo del proyecto es obtener datos representativos sobre la operación de autobuses GNC con el fin de demostrar la reducción en la contaminación por emisiones y el ahorro de energía que obtienen por el empleo de este tipo de autobuses. Dichos autobuses comenzaron a operar en el mes de febrero del año 1999 (NSCA, 2006).

Los resultados arrojaron que el impacto ambiental de los autobuses de GNC fue alrededor de la mitad del correspondiente a los autos de pasajeros y los autobuses de diesel. Sin embargo, el rendimiento operativo de los vehículos de GNC fue peor que el de los autos eléctricos y los autobuses de diesel limpio. Así mismo, los vehículos GNC mostraron escasa fiabilidad durante el período inicial de funcionamiento y, aunque la mayoría de estos problemas se resolvieron durante el desarrollo del proyecto, los niveles de fiabilidad siguen siendo más bajos que los esperados para los vehículos de su edad. Además, hubo algunos problemas con el gas suministrado, que fueron atribuidos por los operadores de los autobuses a las variaciones en la calidad de los combustibles y el agua en el gas (NSCA, 2006).

**Tabla 3.3 Ejemplos de pruebas en autobuses con combustibles limpios.**

Ciudades del Reino Unido	Vehículos	Proyecto	Equipo	Principales resultados
LB Camden	3 miniautobuses de una Flota de Transporte Comunitario	ASTI proyecto accesible de Miniautobus	Iveco Ford con motor Iveco dedicado a gas	Altos costos de capital pero buen desempeño técnico
Southampton	6 autobuses convertidos y 10 autobuses de GNC	Proyecto de entrada del condado de Hampshire	Dennis Dart midi bus	Consumos altos de comb., altos costos de capital y buena respuesta pública
Birmingham	14 autobuses de GNC sobre rutas de servicio comercial	Demostración de viajes sobre GNC en el centro del Reino Unido	Autobús Volvo con motor dedicado lean-burn	Consumos altos de comb., altos costos de capital, algunos problemas de mantenimiento
Merseyside	4 autobuses sobre rutas de Southport	Proyecto Júpiter-2 Merseytravel	Autobús Dennis con motor a gas	Altos costos de capital

Fuente:(NSCA, 2006)

Finalmente se concluyó que en comparación con vehículos diesel, el GNC tiene beneficios específicos en términos de emisiones de NOx y partículas (PM). Las emisiones globales están en función de todos los vehículos que operan en las zonas correspondientes al proyecto. De esta forma, los resultados mostraron prácticamente cero emisiones de PM, mientras que las emisiones de CO<sub>2</sub>, NOx y de hidrocarburos (HC) fueron reducidas en un 3-5% cada una y el uso de la energía total del transporte en las zonas del proyecto se redujo en un 3%.

### **3.3.4 Flotas de HGV's que operan con GNC.**

En contraste con la experiencia en autobuses de GNC, que ha tendido a ser enfocada a la demostración y pruebas por medio de diferentes proyectos, el uso de GNC dentro de flotas de vehículos pesados (HGV's) ha tenido un éxito mucho mayor. Este tipo de vehículos cubren largas distancias en kilómetros que van desde los 130,000 a los 300,000 kilómetros por año sin necesidad del diesel, como sucede con la operación de los autobuses. En este sentido, el GNC como combustible para transporte ha sido visto por una serie de operadores de las flotas británicas como proveedor de potenciales beneficios económicos (NSCA, 2006).

Además, al igual que en la experiencia con autobuses, sólo las flotas que han operado con un número suficiente de vehículos para desarrollar y soportar la infraestructura necesaria, tanto en mantenimiento como en abastecimiento de combustible, son las que han obtenido resultados exitosos. Así mismo, con el objetivo de ser comercialmente exitosa, la flota generalmente necesita embarcarse en un programa de ingeniería con el fin de mejorar su rentabilidad y operatividad (NSCA, 2006).

### **3.4 Lecciones aprendidas en el desarrollo de biogás para transporte.**

El biogás ha sido producido y empleado en vehículos desde hace ya varios años, siendo Suecia el país con la mayor infraestructura global en lo que se refiere al desarrollo de la tecnología. Además de Suecia, como ya se ha mencionado, existe interés por parte de otros países en la aplicación de biogás como combustible para transporte está creciendo rápidamente. Lo anterior se debe a los siguientes factores:

- Reducción del impacto ambiental, debido a que la gasolina y el diesel (combustibles fósiles) se sustituyen por un combustible renovable
- Mejor calidad del aire, debido a que los vehículos alimentados con gas, emiten menos NOx, PM y HC que la gasolina o el diesel (en función de que norma de aplicación y la tecnología de los motores con la que se esté comparando).
- Reducción de la dependencia del petróleo, logrando así una mayor seguridad de suministro de combustible.
- El BG puede ser producido a partir de una amplia gama de materias primas (desechos), tales como los lodos de aguas residuales, la fracción orgánica de los residuos urbanos (FORSU), los residuos del sector agrícola y alimenticio, entre otros.
- A pesar de que en muchos de los casos no es la prioridad, la producción de BG representa una forma de mejorar el ambiente mediante la gestión adecuada de los desechos.
- El BG acondicionado es muy similar al GN y, por lo tanto, las infraestructuras existentes de GNC y los vehículos mismos, pueden ser utilizados para el BG. En este caso, el GN puede ser un complemento en la seguridad del abastecimiento y la red de GN puede transportar biogás acondicionado.

### **3.4.1 México**

En México la atención se ha centrado en la DA viéndola como un proceso de tratamiento de residuos y no como un sistema de generación de

energía. Los rendimientos de producción de BG no han sido una prioridad, ni ha habido un gran esfuerzo en el empleo del mismo como un producto útil. En este sentido, el uso actual que se le da al BG es como combustible para la generación de energía térmica para la aplicación en el proceso mismo de producción de BG y algunos usos para la generación de energía eléctrica. Las principales razones para que algunos países como México prefieran emplear el biogás en la generación de energía eléctrica más que en transporte son:

- Falta de infraestructura necesaria para aplicar el GNC como combustible para los vehículos. Esto ve reflejado en la existencia de sólo tres estaciones de suministro de GNC en el país. Lo que convierte a México en un país pobre en esta tecnología (NGVA, 2009). Sin embargo, el gobierno de nuestro país podría subsidiar la construcción de estaciones de suministro de este combustible.
- Limitada disponibilidad de los vehículos de GNC en México. Los vehículos de gas natural y los motores están disponibles a partir de muchos fabricantes incluyendo: Cummins, Ford, General Motors, Iveco, Volkswagen y Volvo. Sin embargo, estos fabricantes no parecen promover activamente la opción de GN en países que no cuentan con la infraestructura de suministro adecuada, tal es el caso de México.
- Reticencia de los operadores para conducir vehículos que operan con un tipo de combustible diferente a los convencionales. Principalmente si los costos de los autos se incrementan.

Estos son los síntomas clásicos de introducción de mercado de una nueva tecnología. Esto es, no se suministrarán los productos al mercado hasta

que haya compradores, y no habrá compradores hasta que se genere confianza sobre la disponibilidad de vehículos y del combustible.

### **3.5 Factores que llevaron al éxito en países que han desarrollado el sector de biogás en transporte.**

Los conductores más relevantes detrás del éxito del BG como combustible para transporte en algunos países de la Unión Europea como Suecia, Francia y Suiza, han sido fuertemente relacionados a las cuestiones ambientales tales como calidad de aire, cambio climático y gestión de desechos. En un nivel más práctico existen dos razones principales por las que el BG ha sido empleado en varios países de la Unión Europea como un combustible para transporte más que en la generación de energía eléctrica (NSCA, 2006):

- Los precios de venta de la energía eléctrica son bajos. Esto orilla a los gobiernos y empresas privadas a buscar nuevas rutas de empleo para el BG.
- Existe un alto nivel de integración vertical entre los productores de BG y los encargados de las flotas municipales de transporte.

Este último punto es particularmente importante y probablemente ayuda a explicar por qué el mercado de autos pesados a gas ha sido mucho más fuerte en países como Suecia y Francia. Por ejemplo, la experiencia de Lille en la operación de una flota de autobuses de BGC, muestra que con un adecuado compromiso político se logra un mejoramiento sustancial en el impacto que el transporte público puede causar en el medio ambiente. Una estrategia que aborde los principales puntos, como el desarrollo de la

infraestructura y las operaciones de los vehículos es vital. Además, la conversión de las flotas de autobuses de BG depende de un total control de la cadena completa de valor de la producción de BG, para la distribución y aplicación en la flota de vehículos.



#### **4. MEDICIONES EXPERIMENTALES DE EMISIONES CONTAMINANTES GENERADAS POR UN CAMIÓN A GNC Y UNO A DIESEL.**

Se llevaron a cabo pruebas de medición de emisiones generadas por Gas Natural Comprimido (GNC) bajo el supuesto de que estas emisiones serían las mismas que se generarían por la quema del Biogás Comprimido (BGC). Estas emisiones serán comparadas con las emisiones generadas por un camión a diesel con el fin de cuantificar las ventajas o desventajas del BGC con respecto al diesel.

##### **4.1 Metodología Experimental.**

Se llevaron a cabo tres pruebas en campo de medición de emisiones de contaminantes de dos camiones; uno a GNC y otro a diesel. Las pruebas se realizaron sobre dos ciclos de manejo; uno largo y uno corto. Dichos ciclos de manejo se muestran en la Imagen 4.5 y 4.6.

##### **4.1.1 Medición de emisiones en campo.**

Las dos pruebas correspondientes a la medición de emisiones para el camión a GNC se llevaron a cabo los días 10 y 11 de febrero del año en curso, mientras que la prueba de medición de las emisiones del camión diesel se llevó a cabo el día 11 de Febrero del 2010.

**Tabla 4.1 Fechas, horas y duración de las tres pruebas de medición de emisiones.**

	Fecha	Hora de Inicio	Duración de la Prueba
Prueba 1 GNC	10-feb-10	19:08:20	38:22
Prueba 2 GNC	11-feb-10	15:58:07	46:29
Prueba Diesel	11-feb-10	12:56:23	46:17

Las pruebas de medición comenzaron con el montaje del equipo de medición de emisiones al camión. El equipo mide las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO, HC's, NOx, y PM<sub>10</sub>, así como las revoluciones por minuto del motor, la velocidad, la localización y el flujo de gases de salida.

Para medir todas las variables mencionadas, se conectan los siguientes sensores:

Manómetro: El manómetro va instalado del equipo al múltiple de entrada del motor y se encarga de la medición de la presión del aire que llega al múltiple (Imagen 4.1). El valor de presión medido, es necesario para que el equipo calcule el flujo de salida de gases.

**Imagen 4.1 Conexión del manómetro al múltiple de entrada del motor.**



Termopar: También el termopar va conectado al múltiple de entrada del motor (Imagen 4.2). Dicho sensor detecta la temperatura del aire que llega al múltiple

de entrada. Este valor de temperatura es necesario para que el equipo calcule el flujo de salida de gases en el escape.

**Imagen 4.2 Conexión del termopar al múltiple de entrada del motor (el termopar es pegado al múltiple por medio de cinta negra).**



Medidor óptico de RPM: Va montado cerca de una de las poleas del motor como se muestra en la imagen 4.3. Dicho instrumento mide las revoluciones por minuto en forma continua por medio de la emisión de un haz de luz láser que se refleja en un trozo de papel reflector que es pegado a la polea de la banda. Las revoluciones se obtienen en base a las veces que se refleja el haz por unidad de tiempo. Estos valores son necesarios para calcular el flujo de salida.

#### **Imagen 4.3 Montaje del medidor óptico de RPM.**



Posicionador Global (GPS): El GPS (Global Position System, Modelo Garmin 18-X), es colocado y sujetado en el techo de cada uno de los dos camiones por medio de un imán. Mediante dicho instrumento se obtiene de forma continua la posición (latitud y longitud) y la velocidad.

Sondas de medición de emisiones: Las sondas van instaladas en el escape de los vehículos (Imagen 4.4). Estas se encargan de muestrear los gases de salida del escape que llegarán a los sensores del equipo para determinar el porcentaje y la cantidad de contaminantes emitidos en forma continua.

#### **Imagen 4.4 Sondas de medición de emisiones.**



El proceso de montaje de los instrumentos descritos duraba aproximadamente entre 30 - 40 minutos. Durante ese tiempo el equipo permaneció encendido con el fin de inicializar los sensores y que estos llegaran a su temperatura de operación. Este procedimiento de inicialización del equipo es recomendado por el manual de operación del equipo.

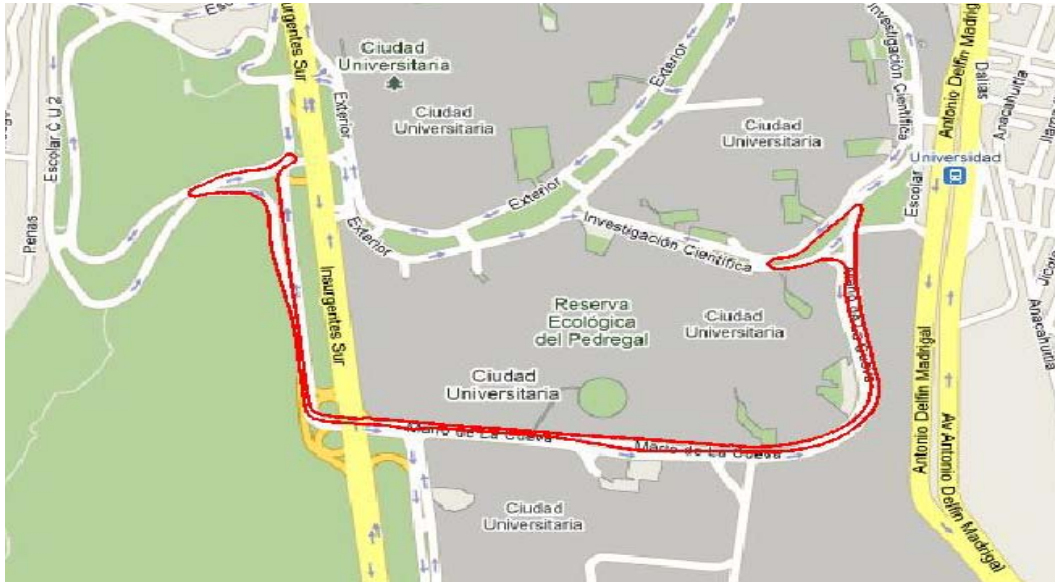
#### **4.1.2 Ubicación del sitio del montaje del equipo y los ciclos de manejo.**

El proceso de montaje y acondicionamiento del equipo de medición se llevó a cabo en el estacionamiento de la Tienda UNAM ubicada a un costado de la estación del metro Universidad de la Línea 3 del servicio de transporte colectivo metro (STCM).

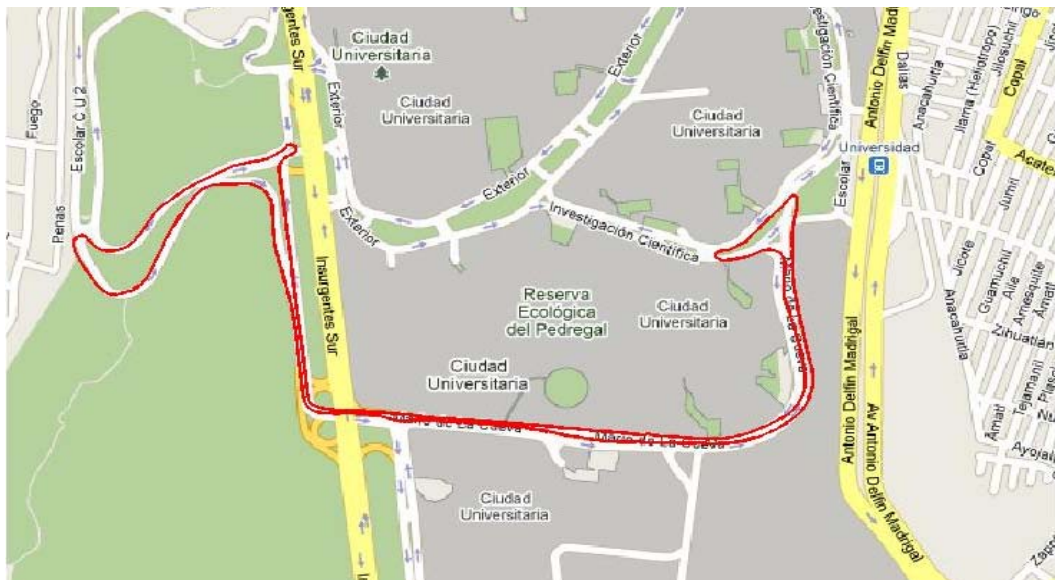
Cada una de las pruebas (GNC / diesel) constaba de tres recorridos continuos a lo largo de dos tipos de ciclo de manejo establecidos, uno largo y

uno corto. La localización de estos ciclos de manejo, usando los datos generados por medio del GPS se muestran en las Imágenes 4.5 y 4.6.

**Imagen 4.5 Ciclo de manejo corto seguido dentro de Ciudad Universitaria, Ciudad de México.**



**Imagen 4.6 Ciclo de manejo largo seguido dentro de Ciudad Universitaria, Ciudad de México.**



A lo largo de los recorridos, una persona se hacía cargo del correcto funcionamiento del equipo de medición Axion. Si el equipo dejaba de medir

alguna de las variables (presión o temperatura del aire de entrada, RPM, posición, o emisiones), el recorrido se desechaba y se recomenzaba otro. Una vez que los tres recorridos terminaban, se daba por terminada la prueba y se procedía a desmontar el equipo.

#### **4.1.3 Descripción de los vehículos empleados.**

Los camiones empleados en las pruebas de medición de emisiones, fueron un a GNC con un motor de ciclo otto (Imagen 4.7) y un camión diesel (Imagen 4.8)

**Imagen 4.7 Camión de GNC - DINA usado en las primeras dos pruebas.**



En la Tabla 4.2 se muestra una comparación entre las características de los camiones empleados. Los conductores de cada uno de los dos camiones fueron personas diferentes. Este factor, así como la diferencia entre las tecnologías influyen sobre los resultados obtenidos, los cuales serán discutidos posteriormente.

**Imagen 4.8 Camión diesel usado en la tercera prueba.**



**Tabla 4.2 Comparación entre las características de cada uno de los dos camiones usados.**

	GNC		Diesel	
	Auto	Motor	Auto	Motor
Modelo	Linner	Cumins VG230	1619	1619
Año	2004	2004	1995	1995
Marca	Dina	Dina	Mercedes Benz	Mercedes Benz
Placas	3113 XB		3576CF	
Peso (kg)	15,876		19,000	
Desplazamiento		5.9 L		5.9 L
Conf. Cilindros	6 en Línea		6 en Línea	
Transmisión		5 Vel.		5 Vel./Dual
Potencia		230 HP @2800 RPM		190 HP



#### 4.1.4 Composición de los combustibles empleados en las pruebas.

La composición del GNC empleado como combustible para la operación del camión a GNC se muestra en la Tabla 4.3. Dicha composición, corresponde al gas provisto en las estaciones de suministro de GNC de la empresa Gazel S.A de C.V.

**Tabla 4.3 Composición del GNC empleado en las primeras dos pruebas.**

$C_6^+$	$C_3H_8$	$iC_4H_{10}$	$nC_4H_{10}$	$nC_5H_{12}$ + $iC_5H_{12}$	$nC_5H_{12}$	$N_2$	$CH_4$	$CO_2$	$C_2H_6$
0.021	0.231	0.026	0.02	0.006	0.006	1.844	95.105	0.177	2.556

Fuente: Gazel, Gas Natural Vehicular, 2010.

La composición del GNC mostrado en la tabla de arriba corresponde a un 73% en peso de Carbono, un 24.5% en peso de hidrógeno y 0.0% en peso de oxígeno, con una viscosidad de 2,570 g/galón.

La composición del diesel empleado es de 86.4 % en peso de carbono, 13.6 % en peso de hidrógeno y 0.0 % en peso de oxígeno, con una viscosidad de 3,200 g/galón.

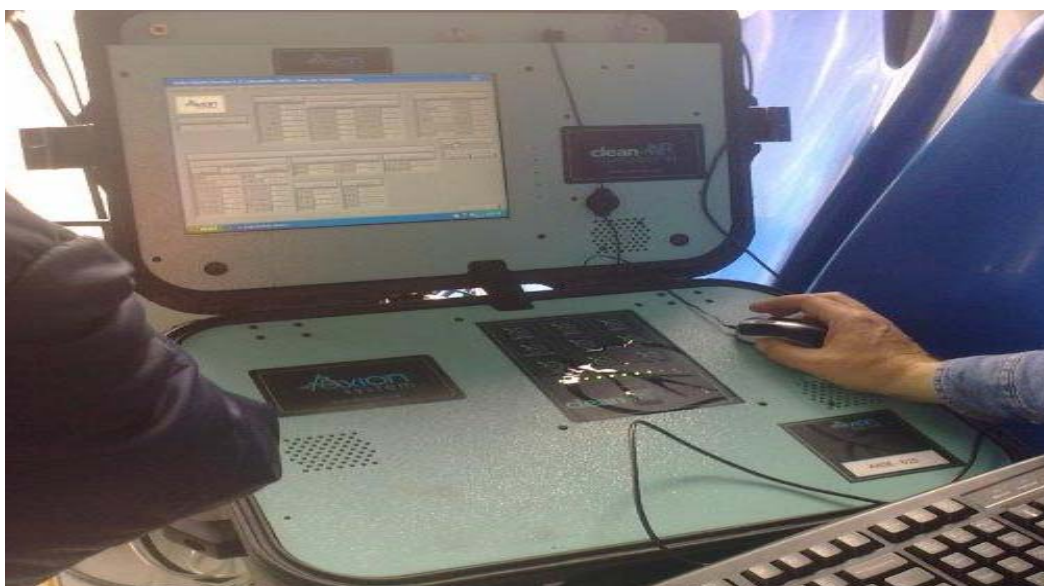
El diesel se compone principalmente por compuestos orgánicos de la familia de los alquenos, tales como el  $C_{12}H_{23}$ . Sin embargo, la composición puede variar, caracterizándose por contener desde  $C_{10}H_{20}$  hasta  $C_{15}H_{23}$ .

#### **4.1.5 Equipo de Medición AXION.**

El equipo Axion es un sistema portátil – a bordo, de medición de emisiones para motores de combustión interna. Las mediciones que el equipo realiza pueden ser leídas segundo a segundo en una pantalla (Imagen 4.9).

El equipo Axion está diseñado para medir las emisiones durante la utilización real del vehículo en su operación cotidiana. El equipo es intrínsecamente seguro y se ha utilizado en un número considerable de pruebas de emisiones en diferentes estudios.

#### **Imagen 4.9. Descripción del equipo de medición Axion.**



##### **4.1.5.1 Portabilidad y requisitos de alimentación**

El equipo Axion es portátil dado que tiene un peso aproximado de 15.88 kilogramos y por lo tanto, puede transportarse a cualquier lugar como una simple maleta de equipaje.

Para que pueda ser encendido, el equipo necesita ser alimentado por el sistema eléctrico del vehículo de 12 VCD<sup>4</sup>. El consumo de energía está entre 5-8 A<sup>5</sup> a 13.8 VCD.

#### **4.1.5.2 Tiempo de montaje del equipo.**

El tiempo de montaje del equipo es de entre 5 y 30 minutos. Este intervalo comprende el tiempo en el que el equipo es desmontado de un auto y está totalmente montado en el de prueba. El sistema completo está disponible en dos cajas de plástico resistente a la intemperie. Una contiene el sistema de seguimiento en sí y la otra contiene la entrada de la muestra y de las líneas de escape, los cables de alimentación de corriente y de datos, regulador de presión de gas de calibración entre otros.

#### **4.1.5.3 Calibración del equipo.**

Para que se lleve a cabo la medición de emisiones, el equipo requiere ser calibrado mediante una mezcla compuesta por C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO. Datos generados por varios experimentos han demostrado que, cuando el Axion es operado simultáneamente con un sistema de medición de emisiones fijo en laboratorio, la diferencia es típicamente menor al 10 % en las emisiones de NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub>. La precisión de las mediciones de CO y HC depende del combustible utilizado y de los niveles de emisión. La exactitud de la medición de PM<sub>10</sub> no se ha cuantificado hasta el momento.

---

<sup>4</sup> Volts de Corriente Directa.

<sup>5</sup> Amperes.

#### **4.1.5.4 Vehículos y combustibles con los que opera el equipo.**

El equipo Axion se puede utilizar en prácticamente cualquier motor de combustión interna, y con prácticamente cualquier combustible. De esta forma, pueden ser llevadas a cabo pruebas de emisiones sobre autos compactos, camiones ligeros, furgonetas, autobuses de tránsito escolar, camiones de caja, y remolques de tractor. Dichos vehículos pueden ser impulsados por medio de gasolina, GNC / BGC, diesel / biodiesel.

El vehículo sobre el que es probado el equipo Axion normalmente no requiere ninguna modificación. Las únicas excepciones son la inserción de un sensor de presión en un vacío existente o la presión de sobrealimentación del turbocompresor de línea o de los accesorios.

#### **4.1.5.5 Variables de medición del equipo.**

El Axion guarda en su memoria local segundo a segundo la medición de variables como la velocidad, RPM del motor, presión de entrada de aire, temperatura del aire de entrada, los flujos de los contaminantes emitidos, el flujo de gases de escape y la masa de los contaminantes medidos.

Dentro de las pruebas de medición, el usuario puede definir el inicio y el final de los segmentos de análisis (ciclos de manejo). Esto permite al usuario hacer un análisis de los datos de emisiones más completo.

#### **4.1.5.6 Medición del flujo de gases**

El flujo de gases de salida es medido de forma indirecta usando parámetros de operación del motor, conociendo las características del motor y

de los combustibles así como la concentración de los gases de salida. Los parámetros de operación del motor son adquiridos a través de un puerto de diagnóstico disponible de la unidad de control del motor, o como en nuestro caso, por un conjunto de sensores conectados al motor temporalmente, no intrusivamente, y pasivamente.

#### **4.1.5.7 Gases contaminantes que mide el equipo.**

Los gases contaminantes que el equipo Axion mide son: CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub>, y PM<sub>10</sub>.

La medición de HC, CO<sub>2</sub> y CO se lleva a cabo por Infrarrojo no dispersivo (NDIR, por sus siglas en inglés) en una longitud de onda entre 3-4 micrometros.

EL NO<sub>x</sub> es medido como NO (monóxido de nitrógeno) por una celda electroquímica. En la mayoría de los motores de combustión interna, las emisiones de NO<sub>x</sub> se pueden deducir del NO.

La medición de PM<sub>10</sub> se lleva a cabo mediante la dispersión de luz.

#### **4.1.5.8 Sensores del equipo.**

El equipo de medición cuenta con el analizador de gas OEM Andros 6500 para la medición de emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y HC's. Este instrumento se basa en un sistema de infrarrojo no dispersivo para medir las emisiones de los compuestos mencionados. Cada sistema Andros 6500 se calibra de fábrica individualmente para el funcionamiento de 0 °C a 50 °C en todo el intervalo de concentraciones especificadas. Los resultados de este proceso de calibración

intensiva se almacenan dentro de cada sistema para que se generen los resultados de emisiones más exactos posibles.

El Andros 6500 incorpora la óptica de haz de alta precisión, en donde un concentrado haz infrarrojo generado a partir de un emisor de propiedad, pasa a través de una celda de cristal de alta precisión en donde se encuentra la muestra del gas de interés que está fluyendo a través de ésta (Lumasense, 2010). El haz pasa entonces, a través de un conjunto de filtros ópticos y llega a un único detector multi-elemento.

**Imagen 4.10 Instrumento Andros 6500.**



Todas las mediciones generadas por medio del Andros 6500 se realizan en tiempo real (segundo a segundo) y los datos son transmitidos al equipo Axion.

A parte del Andros 6500, el Axion cuenta con un sensor de Oxígeno y otros de NOx.

Los sensores de NOx están compuestos por celdas acuosas electroquímicas. Estos sensores representan la mejor alternativa para equipos de

medición portátiles como el Axion debido a que son compactos y muy sencillos de operar. Sin embargo, adolecen de tiempos de respuesta alta (5-10 seg). También proporcionan una precisión relativamente pobre ( $\pm 25$  ppm), especialmente en el campo de medida de baja, y se caracterizan por escasez de fiabilidad (Ensfield, 2002). En el caso del equipo Axion, se cuenta con dos analizadores de NO<sub>x</sub> de la marca Andros con el fin de eliminar en la medida de lo posible dicha incertidumbre.

El equipo Axion cuenta con dos analizadores de oxígeno de la marca Andros. Estos analizadores cuentan una precisión muy alta ( $\pm 0.1\%$  de concentración de O<sub>2</sub>), que se debe a la baja cantidad de O<sub>2</sub> que se genera a la salida de los gases de emisión (menos del 1%).

Este tipo de sensores son generalmente calibrados por una mezcla que contenga 21% de O<sub>2</sub>. Así, cuando este sensor es usado en conjunción con el Andros 6500, éste debe de ser regularmente calibrado (Bergmaier, 2010).

**Imagen 4.11 Sensor de Oxígeno Andros.**



#### **4.1.5.9 Ventajas del Equipo Axion.**

- El equipo Axion cuenta con un límite de detección alto y el intervalo de medida de emisiones también es alto.
- Capacidad de medición en tiempo real (por lo menos una serie de datos por segundo).
- El movimiento y vibración ocasionados por la operación del vehículo no genera ningún efecto sobre la medición de emisiones.
- El equipo es compacto, ligero y presenta un bajo consumo de energía.
- Los datos generados por la medición están disponibles de forma inmediata en campo.
- Es un sistema seguro y fácil de instalar.



## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Tabla 5.1 se muestra el promedio de emisiones de CO<sub>2</sub>, CO, HC's, NOx, y PM<sub>10</sub> obtenido a partir de las hojas de cálculo Excel generadas segundo a segundo por el equipo Axion. Los promedios mostrados en la Tabla 5.1 corresponden a datos filtrados, en los que se desecharon aquellos en donde la velocidad fuera igual que cero y aquellos otros en donde las emisiones dieran valores negativos.

**Tabla 5.1 Promedio general de emisiones para cada una de las tres pruebas.**

	CO <sub>2</sub> (g/s)	CO (mg/s)	HC (mg/s)	NOx (mg/s)	PM <sub>10</sub> (mg/s)
Primera prueba GNC	5.571	5.420	38.805	40.339	0.003
Segunda prueba GNC	5.864	7.749	50.365	46.644	0.003
Prueba diesel	4.308	21.621	17.644	52.955	0.003

De acuerdo con los datos mostrados en la Tabla 5.1, las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por medio de la operación con GNC son ligeramente mayores que las generadas por la operación con diesel. Así mismo, las emisiones de HC's son también mayores en una alta proporción. En contraste, las emisiones de CO, NOx generadas por el GNC son considerablemente menores que las emisiones correspondientes al diesel. Por otra parte, las emisiones de PM<sub>10</sub> generadas por los dos combustibles son prácticamente las mismas.

### 5.1 Comparación general de emisiones por prueba.

Para generar un panorama más claro de las emisiones que se generan por la quema de los combustibles en cuestión, es necesario hacer un análisis de las emisiones por kilómetro que se generan por prueba y por ciclo de

manejo, y determinar la influencia de la velocidad sobre la generación de emisiones.

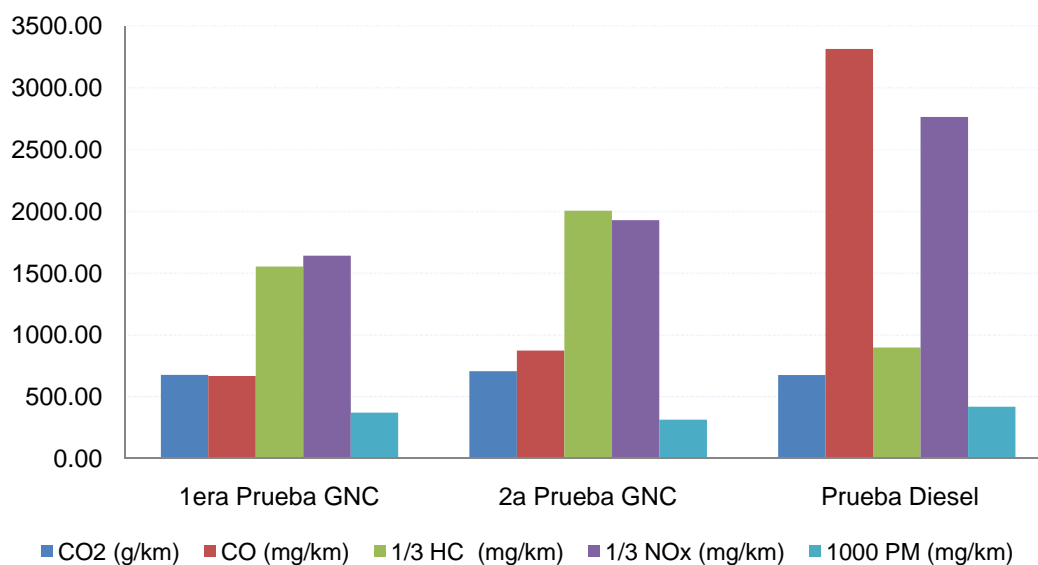
En la Tabla 5.2 se muestran los promedios de emisiones de contaminantes por kilómetro para cada una de las tres pruebas realizadas. En dicha tabla se puede notar una reducción sustancial en las emisiones de CO, NOx y PM<sub>10</sub> generadas por la combustión del GNC con respecto al diesel.

Estos resultados pueden apreciarse de manera más clara en la Figura 5.1.

**Tabla 5.2 Promedios de emisiones por kilómetro para cada una de las tres pruebas.**

	CO <sub>2</sub> (g/km)	CO (mg/km)	HC (mg/km)	NOx (mg/km)	PM <sub>10</sub> (mg/km)
1era Prueba GNC	676.782	667.832	4,659.843	4,922.105	0.371
2a Prueba GNC	706.495	874.038	6,015.422	5,784.852	0.314
Prueba diesel	675.334	3,314.541	2,694.176	8,292.845	0.419

**Figura 5.1 Promedio general de emisiones por kilómetro para cada una de las tres pruebas.**



Comparando el promedio de las emisiones generadas por las dos pruebas de GNC contra las emisiones generadas por la prueba a diesel, se tiene que las emisiones de contaminantes generadas por el diesel aumentan con respecto al promedio de las dos pruebas de GNC en los siguientes porcentajes: CO 329.9 %, NOx 54.9 % y PM<sub>10</sub> 22.2 %. En contraste, las emisiones promedio de HC's correspondientes a las dos pruebas de GNC aumentan en un 98.1 % con respecto a las de diesel. Mientras que las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por las dos pruebas a GNC aumentan en un 2.4 % con respecto a las generadas por el diesel.

Las únicas emisiones generadas por el GNC que aumentan considerablemente con respecto al diesel son las de HC's, ya que las emisiones de CO<sub>2</sub> también aumentan pero dentro de un intervalo razonable. Posteriormente se explicará por qué se obtuvieron tan altas emisiones de HC's para el GNC.

Haciendo una comparación entre las emisiones generadas por las dos pruebas a GNC, se puede ver que las emisiones correspondientes a la segunda prueba son más altas que las generadas por la primera (Figura 5.1). Dicho aumento en emisiones se debe principalmente a que la prueba segunda correspondiente al GNC está compuesta por dos tipos diferentes de ciclos de manejo, uno corto y dos largos. Dichos tipos de ciclos (recorridos), y los efectos que se generan por cada uno de éstos en lo que se refiere a la generación de emisiones se discuten abajo.

## 5.2 Emisiones generadas por recorrido y análisis por contaminante.

El análisis previo, concerniente a la comparación del promedio de emisiones por kilómetro generadas por las dos pruebas de GNC contra las generadas por el diesel, no nos provee de un balance preciso de la reducción o aumento en emisiones que se generan por la combustión del GNC con respecto al diesel (Tabla 5.2). Lo anterior se debe a que la segunda prueba a GNC estuvo compuesta por un ciclo corto y dos largos. Por lo tanto, si se pretende generar un análisis más preciso y confiable de las emisiones generadas por cada uno de los dos combustibles, es necesario hacer un análisis por tipo de ciclo de manejo. Para esto, la Tabla 5.3 muestra una comparación entre la generación de emisiones de contaminantes por kilómetro para los recorridos de las dos pruebas de GNC contra los recorridos correspondientes a la prueba a diesel.

**Tabla 5.3 Emisiones promedio por kilómetro para cada uno de los recorridos que conforman las pruebas.**

		CO <sub>2</sub> (g/km)	CO (mg/km)	HC (mg/km)	NOx (mg/km)	PM <sub>10</sub> (mg/km)	Duración (min.)	Vel (km/h)
Prueba 1 GNC	Recorrido 1	718.0	596.7	5291.6	5118.2	0.39	13:20	28.53
	Recorrido 2	659.9	823.4	4337.8	4649.5	0.34	12.11	31.26
	Recorrido 3	652.4	583.4	4350.1	4998.6	0.39	12.51	30.71
	<b>Promedio</b>	<b>676.8</b>	<b>667.8</b>	<b>4659.8</b>	<b>4922.1</b>	<b>0.37</b>	<b>12:47</b>	<b>30.17</b>
Prueba 2 GNC	Recorrido 1	684.4	521.1	5569.4	6480.1	0.30	12:02	29.90
	Recorrido 2	709.4	1021.8	6037.3	5472.0	0.32	15:15	30.14
	Recorrido 3	725.7	1079.3	6439.6	5402.4	0.32	19:12	29.19
	<b>Promedio</b>	<b>706.5</b>	<b>874.0</b>	<b>6015.4</b>	<b>5784.9</b>	<b>0.31</b>	<b>15:29</b>	<b>29.75</b>
Prueba diesel	Recorrido 1	685.0	3473.9	2995.2	8450.6	0.43	15:54	22.16
	Recorrido 2	670.6	3193.6	2671.6	8125.2	0.39	15:32	26.63
	Recorrido 3	670.4	3276.2	2415.8	8302.8	0.44	14:51	24.89
	<b>Promedio</b>	<b>675.3</b>	<b>3314.5</b>	<b>2694.2</b>	<b>8292.9</b>	<b>0.42</b>	<b>15:25</b>	<b>24.56</b>

De los recorridos mostrados en la Tabla 5.3, los tres correspondientes a la primera prueba a GNC, el primero de la segunda prueba a GNC y los tres de la prueba diesel fueron recorridos de ciclos cortos. En constaste, el segundo y tercer recorrido de la de la segunda prueba a GNC fueron recorridos de ciclos largos. La diferencia entre los dos tipos de recorridos se aprecia en las Imágenes 4.5 y 4.6. Los recorridos largos fueron incluidos con el objeto de determinar el efecto en la generación de emisiones producido por el sometimiento del motor a un esfuerzo mayor al usual, al incurrir en pendientes del terreno mayores. De acuerdo con lo dicho, se esperaría que al someterse a un forzamiento mayor al motor, se genere un mayor porcentaje de emisiones.

Observando la Tabla 5.3, se puede ver que los promedios de emisión correspondientes al segundo y tercer recorrido de la segunda prueba a GNC (recorridos largos) son diferentes a los resultados generados por los tres recorridos de la primera prueba a GNC y al primero de la segunda (recorridos cortos). Dado que las pruebas están compuestas por diferentes tipos de recorridos o ciclos de manejo, lo más coherente es hacer dos análisis; uno que tome en cuenta las emisiones generadas por los recorridos cortos y otro que haga lo mismo pero para los recorridos largos.

### **5.2.1 Análisis de emisiones para los recorridos cortos.**

Como ya se ha mencionado, la primera prueba a GNC estuvo compuesta en su totalidad por recorridos cortos al igual que la prueba diesel, mientras que, en lo concerniente a la segunda prueba a GNC, el único

recorrido corto fue el primero. En la Tabla 5.4 se muestran los promedios de emisiones para todos los recorridos cortos llevados a cabo.

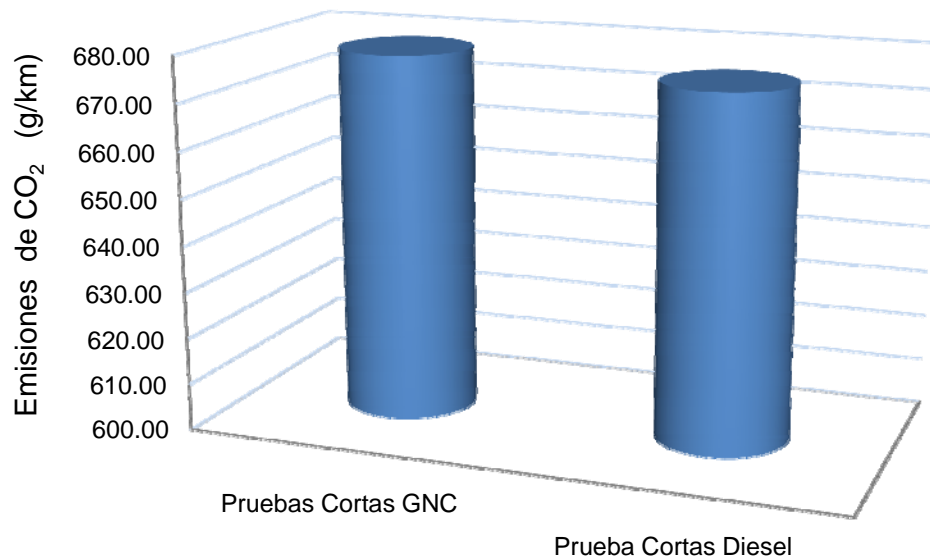
En la Tabla 5.4, los tres primeros recorridos de las pruebas con GNC corresponden a la primera prueba. El cuarto recorrido, corresponde al primero de la segunda prueba a GNC. Estos recorridos se unificaron dado a que pertenecen al mismo combustible y al mismo tipo de recorrido.

**Tabla 5.4 Emisiones promedio para los recorridos cortos.**

		CO <sub>2</sub> (g/km)	CO (mg/km)	HC (mg/km)	NO <sub>x</sub> (mg/km)	PM <sub>10</sub> (mg/km)
Pruebas GNC	Recorrido 1	718.0	596.7	5291.6	5118.2	0.39
	Recorrido 2	659.9	823.4	4337.8	4649.5	0.34
	Recorrido 3	652.4	583.4	4350.1	4998.6	0.39
	Recorrido 4	684.4	521.1	5569.4	6480.1	0.30
	<b>Promedio</b>	<b>678.7</b>	<b>631.2</b>	<b>4887.2</b>	<b>5311.6</b>	<b>0.35</b>
Prueba diesel	Recorrido 1	685.0	3473.9	2995.2	8450.6	0.43
	Recorrido 2	670.6	3193.6	2671.6	8125.2	0.39
	Recorrido 3	670.4	3276.2	2415.8	8302.8	0.44
	<b>Promedio</b>	<b>675.3</b>	<b>3314.5</b>	<b>2694.2</b>	<b>8292.9</b>	<b>0.42</b>

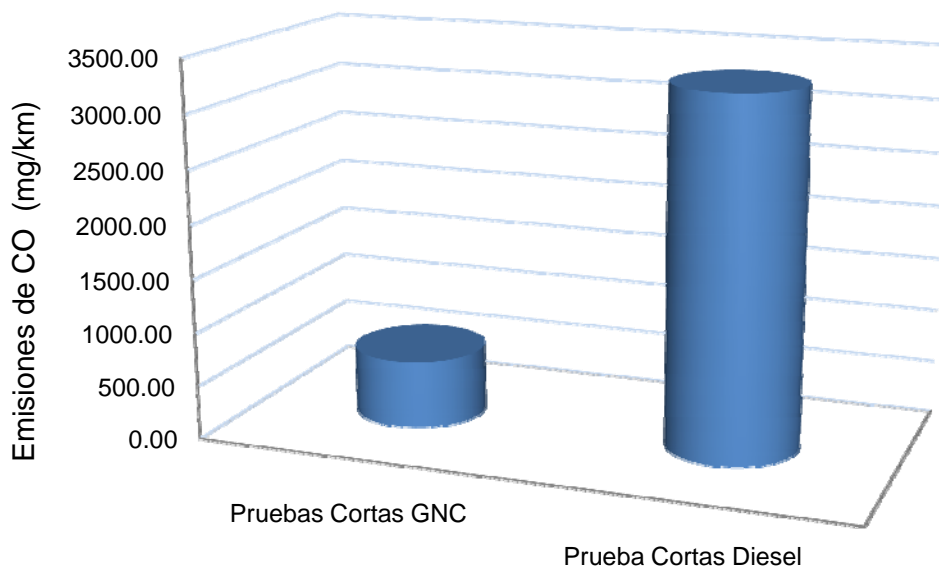
De acuerdo con la Tabla 5.4, el GNC genera prácticamente la misma cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> que el diesel. Así, el GNC produce 0.49% más de emisiones de CO<sub>2</sub> con respecto al diesel.

**Figura 5.2 Comparación de emisiones de CO<sub>2</sub> (g/km) generadas en recorridos cortos.**



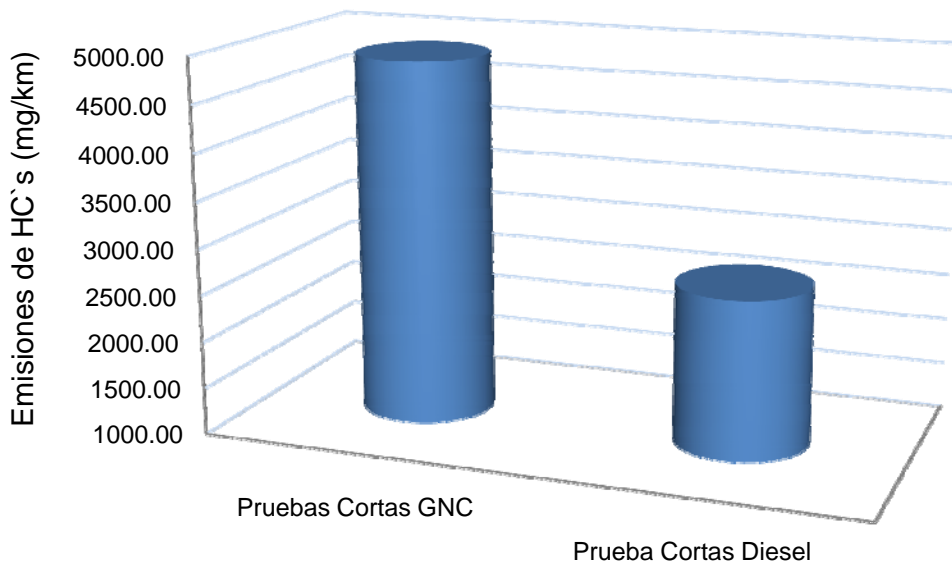
En lo que respecta a las emisiones de CO, el diesel genera un 425.1 % más que el GNC. Esta es una cifra significativa, que nos sirve como claro indicador de que la combustión del GNC es mucho más eficiente que la combustión del diesel (Figura 5.3).

**Figura 5.3 Comparación de emisiones de CO (mg/km) generadas en recorridos cortos.**



En lo que respecta a la generación de emisiones de HC's, el GNC genera un 81 % más que el diesel (Figura 5.4). Ésta es una cifra considerable que se debe a una fuga de combustible en el camión de GNC. Dicha fuga causa que el gas salga del escape sin ser quemado, causando que los sensores de medición de HC's midan directamente las emisiones de CH<sub>4</sub>, como si estas fueran producto de la combustión.

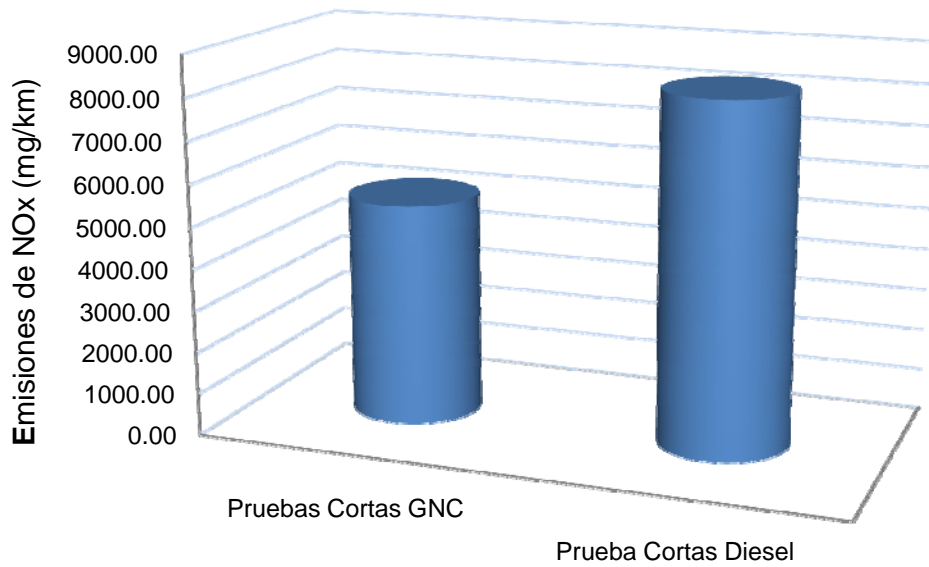
**Figura 5.4 Comparación de emisiones de HC's (mg/km) generadas en recorridos cortos.**



Analizando la generación de NOx por parte de los dos combustibles, el diesel emite 56.1 % más de NOx que el GNC (Figura 5.5). Este porcentaje de disminución de NOx por parte del GNC es también considerable y debe ser tomado en cuenta como una ventaja sustancial del GNC sobre el diesel.

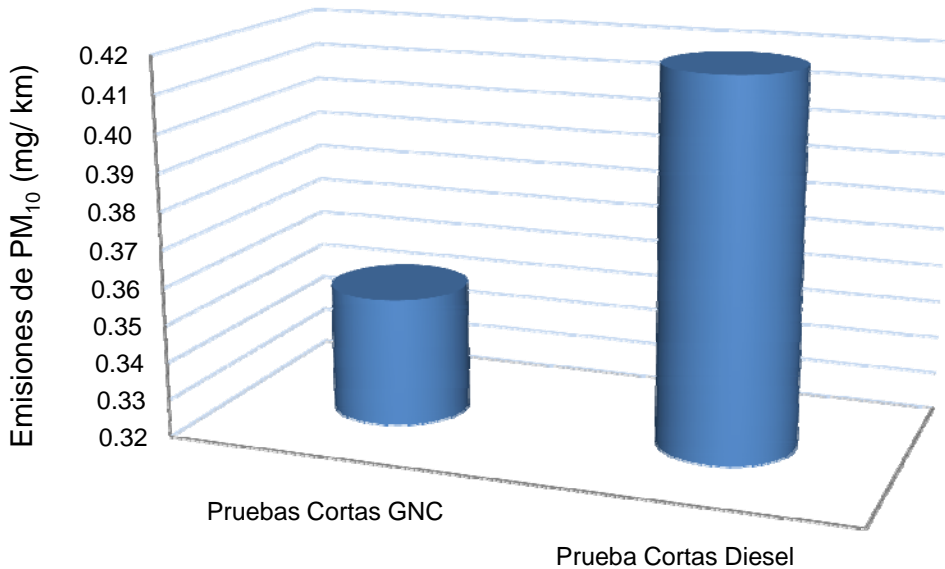


**Figura 5.5 Comparación de emisiones de NOx (mg/km) generadas en recorridos cortos.**



En lo que respecta a la generación de emisiones de PM<sub>10</sub>, el diesel genera un 18.2% más que el GNC (Figura 5.6). Este porcentaje, al igual que el de CO y NOx, es significativo y pone al GNC en ventaja con respecto al diesel.

**Figura 5.6 Comparación de emisiones de PM<sub>10</sub> (mg/km) generadas en recorridos cortos.**



De acuerdo con los resultados presentados, el GNC representa una ventaja considerable sobre el diesel en la generación de emisiones de CO, NOx, y PM<sub>10</sub>. Siendo mucho más pronunciada la ventaja en las emisiones de CO y NOx. Para estos compuestos, con el uso del diesel, se incrementan las emisiones en un 425.1 % y 56.1 % respectivamente con respecto al GNC.

### 5.2.2 Análisis de recorridos largos.

Se llevaron a cabo dos recorridos largos para el GNC y ninguno para el diesel. Esto representa una desventaja ya que sólo se podrá determinar el porcentaje de aumento en emisiones generado por un recorrido largo con respecto a uno corto. Pero no se podrá hacer la comparación entre recorridos largos para los dos combustibles (diesel, GNC). Los valores de emisión correspondientes a los dos recorridos largos se indican en la Tabla 5.5.

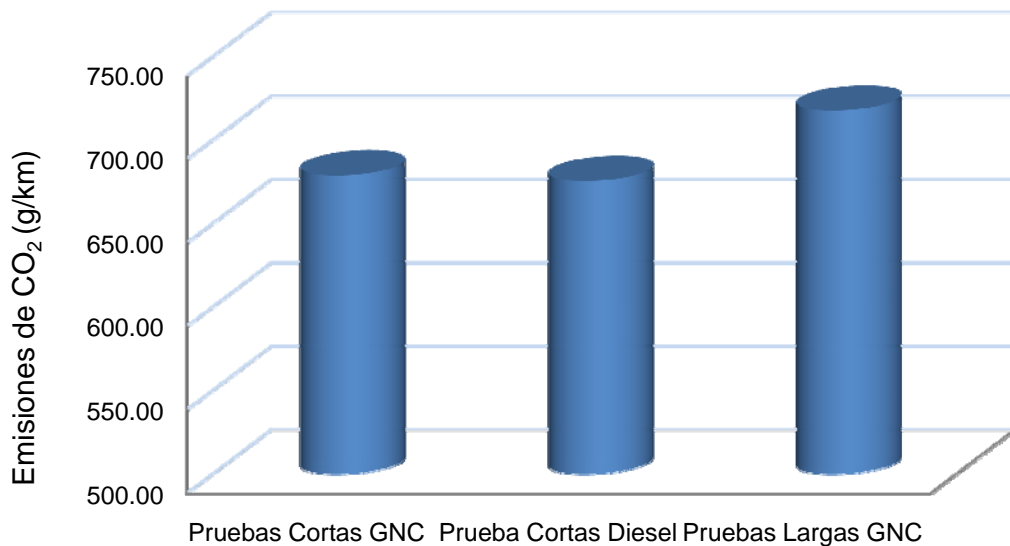
**Tabla 5.5 Emisiones promedio para los recorridos largos.**

		CO <sub>2</sub> (g/km)	CO (mg/km)	HC (mg/km)	NOx (mg/km)	PM <sub>10</sub> (mg/km)
Recorridos Largos GNC	Recorrido 1	709.4	1021.8	6037.3	5472.0	0.32
	Recorrido 2	725.7	1079.3	6439.6	5402.4	0.32
	<b>Promedio</b>	<b>717.5</b>	<b>1050.5</b>	<b>6238.4</b>	<b>5437.2</b>	<b>0.32</b>

A continuación, las emisiones para los recorridos largos son comparados contra los recorridos cortos del GNC y contra los recorridos cortos correspondientes a la prueba diesel. Esto con el fin determinar la influencia que, las pendientes correspondientes a los recorridos largos, tienen sobre la generación de emisiones.

El promedio de emisiones de CO<sub>2</sub> para los dos recorridos largos de GNC es mayor en un 5.7 % que el promedio de los recorridos cortos de GNC y en un 6.2 % que el promedio para los recorridos diesel (Figura 5.7). Entonces, el valor de emisiones de CO<sub>2</sub> para los recorridos largos es mayor que el correspondiente a los recorridos cortos y a los recorridos a diesel. Por lo tanto, en lo que respecta a emisiones de CO<sub>2</sub>, no se recomienda la aplicación de un vehículo a gas en un ciclo de manejo con pendientes pronunciadas.

**Figura 5.7 Comparación de emisiones de CO<sub>2</sub> (g/km) generadas en recorridos largos.**

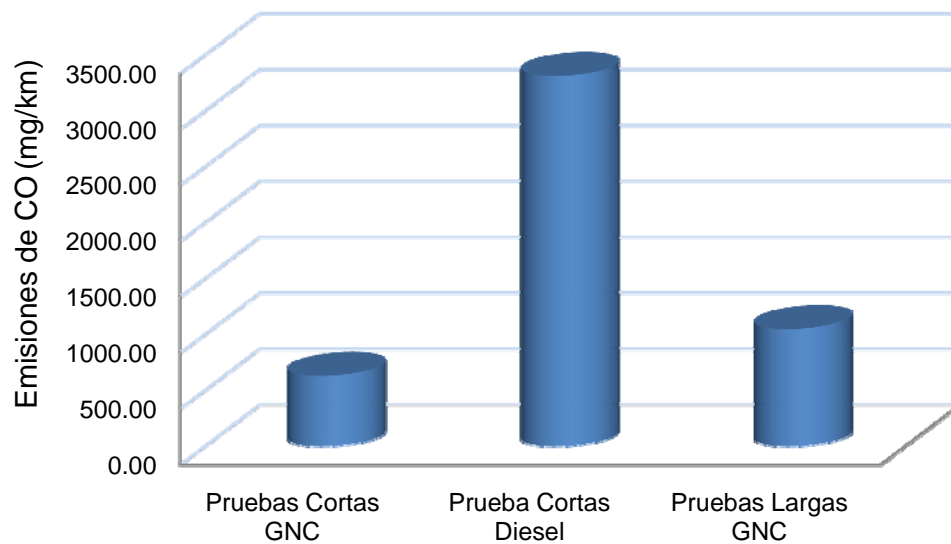


La generación de emisiones de CO para los recorridos largos de GNC, es mayor que la correspondiente a los recorridos cortos en 66.4 %. El hecho de que hayan aumentado en tal grado las emisiones de CO es un claro indicador de que la eficiencia del proceso de combustión, dentro del motor de chispa de GNC, depende fuertemente del grado de forzamiento del motor que se presenta cuando éste es sometido a pendientes pronunciadas.

Por otro lado, las emisiones de CO generadas por el diesel son 215.5 % mayores que las emisiones de CO correspondientes a los recorridos largos de

GNC (Figura 5.8). Dicho porcentaje nos confirma al GNC como un mejor combustible que el diesel en lo que a emisiones de CO se refiere. Aún en recorridos largos, en donde la ventaja del GNC sobre el diesel continúa siendo considerable.

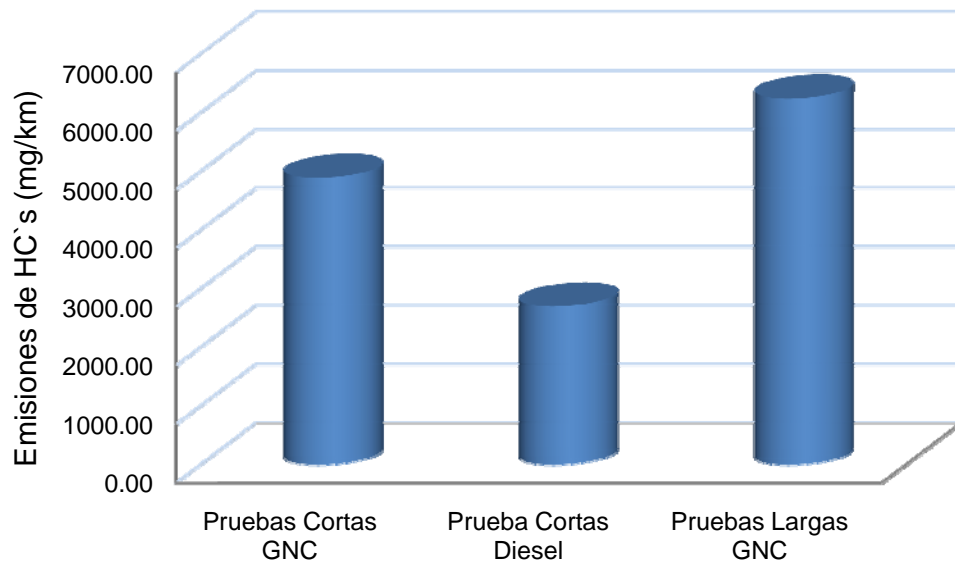
**Figura 5.8 Comparación de emisiones de CO (mg/km) generadas en recorridos largos.**



Las emisiones de HC's para los recorridos largos aumentan en un 27.6 % con respecto a las generadas por los recorridos cortos para el mismo contaminante (Figura 5.9). Éste es un porcentaje considerable, que de igual forma nos indica que la eficiencia del proceso de combustión es inversamente proporcional al forzamiento del motor generado por las pendientes pronunciadas encontradas en el camino largo.

Por otro lado, las emisiones de HC's generadas por los recorridos largos de GNC son 131.5 % mayores que las generadas por el diesel. Este problema se debe – como ya se mencionó - a la fuga de combustible que presenta el camión de GNC.

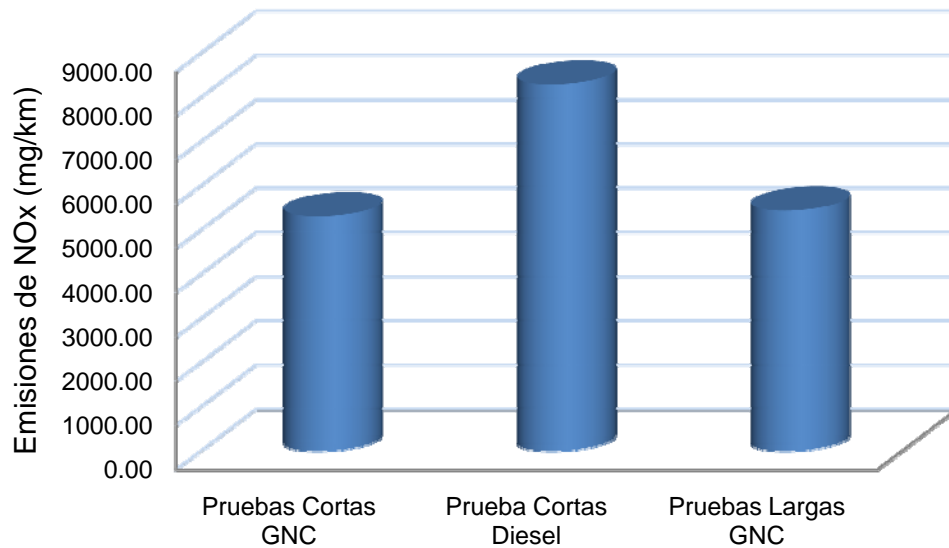
**Figura 5.9 Comparación de emisiones de HC`s (mg/km) generadas en recorridos largos.**



Las emisiones de NOx generadas en los recorridos largos a GNC sólo son 2.3 % mayores que las generadas en los recorridos cortos a GNC (Figura 5.10). El hecho de que las emisiones de NOx no aumenten en un porcentaje tan considerable, resulta en un factor favorable para la implementación de un vehículo a gas en ciclos de manejo con pendientes pronunciadas.

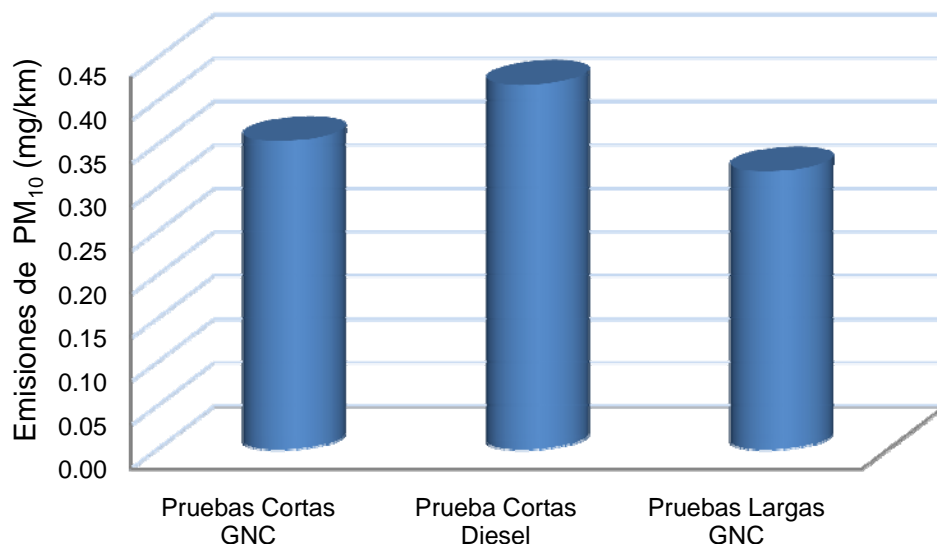
En lo que respecta al diesel, éste combustible genera un 52.5 % más de emisiones de NOx que el GNC en recorridos largos. Por lo tanto, el GNC resulta ser preferible sobre el diesel en lo que emisiones de NOx se refiere, aún en recorridos que contengan pendientes pronunciadas a lo largo de su extensión.

**Figura 5.10 Comparación de emisiones de NOx (mg/km) generadas en recorridos largos.**



Las emisiones de  $PM_{10}$  generadas por el GNC en los recorridos largos, disminuyen en un 10.9 % con respecto a los recorridos cortos. Por otro lado, las emisiones de  $PM_{10}$  generadas por el diesel aumentan con respecto a los recorridos largos del GNC en un 31.1%. Por lo tanto, es altamente recomendable la aplicación del GNC con respecto al diesel en lo que concierne a la generación de emisiones de  $PM_{10}$ . Más aún en recorridos con pendientes pronunciadas, en donde la eficiencia de generación de  $PM_{10}$  aumenta.

**Figura 5.11 Comparación de emisiones de PM<sub>10</sub> (mg/km) generadas en recorridos largos.**



### 5.3 Análisis con respecto a la velocidad.

En la Tabla 5.6 se muestra el promedio de velocidad para cada una de las pruebas. En ella se puede ver que el promedio de velocidad para las pruebas a GNC es más alto que el correspondiente a las pruebas a diesel. Además, el promedio de velocidad para los recorridos largos a GNC es prácticamente el mismo que el correspondiente a los recorridos cortos del mismo combustible.

**Tabla 5.6 Comparación de los promedios de velocidad para los diferentes recorridos.**

	Vel. Promedio (km/h)
Recorridos cortos GNC	30.1
Recorridos largos GNC	29.67
Prueba diesel	24.56

Al ser mayor el promedio de velocidad para los recorridos cortos de GNC que el promedio de velocidad para la prueba diesel, se esperaría que las emisiones de CO<sub>2</sub> para los recorridos cortos de GNC fueran mayores que las correspondientes a los recorridos diesel. Lo anterior se debe al hecho de que una mayor velocidad implica un mayor gasto de combustible, y por lo tanto, una mayor generación de emisiones de CO<sub>2</sub>. Contrario a lo que se esperaría, las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por parte de los dos combustibles son prácticamente las mismas. Esto nos dice que, si el promedio de velocidad para los recorridos cortos de GNC fuera el mismo que el correspondiente a los recorridos diesel, entonces las emisiones generadas por el camión a GNC tendrían que ser menores que las del camión a diesel debido a una baja en el consumo de combustible.

#### 5.4 Análisis con respecto al consumo de combustible.

Para determinar el consumo de combustible nos basamos en la reacción (1).



De esta reacción se puede deducir que los gramos de carbono contenidos en los combustibles (GNC, diesel), son los mismos que se tienen en los productos de combustión (CO<sub>2</sub>, CO, HC). Entonces se calculan los gramos de carbono presentes en el CO<sub>2</sub> y en el CO emitidos en cada uno de los diferentes recorridos. Esto se hace tomando en cuenta el porcentaje en peso de carbono en cada uno de los dos compuestos, siendo para el CO<sub>2</sub> de 27.3 0 %, y para el CO de 42.9 %. Una vez que se han obtenido los gramos de



carbono presentes tanto en el CO<sub>2</sub>, como en el CO, entonces se hace la suma de las dos cantidades y se obtienen los gramos totales de carbono que se producen en la combustión. Dichos gramos de carbono serán los mismos que se encuentran presentes en los combustibles. Por lo tanto, si sabemos que el porcentaje de carbono en el diesel es de 86.4 % y en el GNC es de 73 % entonces podemos llegar, por medio de una simple regla de tres, a los gramos totales de combustible que son quemados por kilómetro. Si queremos convertir esa cantidad a litros de combustible quemados por kilómetro, entonces tendremos que hacer uso de los datos de densidad de los combustibles. Los resultados de rendimiento de combustible se muestran en la Tabla 5.7.

**Tabla 5.7 Consumo de combustible por parte de los dos combustibles.**

		g de C en el CO <sub>2</sub>	g de C en el CO	Carbon o total	g de combustible por km	Km / l
Recorridos Cortos GNC	Recorrido 1	196.03	0.26	196.28	268.88	2.53
	Recorrido 2	180.17	0.35	180.52	247.29	2.75
	Recorrido 3	178.12	0.25	178.37	244.34	2.78
	Recorrido 4	186.86	0.22	187.09	256.28	2.65
	<b>Promedio</b>	<b>185.30</b>	<b>0.27</b>	<b>185.57</b>	<b>254.20</b>	<b>2.67</b>
Recorridos Largos GNC	Recorrido 1	193.67	0.44	194.10	265.90	2.55
	Recorrido 2	198.12	0.46	198.59	272.04	2.50
	<b>Promedio</b>	<b>195.90</b>	<b>0.45</b>	<b>196.35</b>	<b>268.97</b>	<b>2.52</b>
Prueba Diesel	Recorrido 1	187.02	1.49	188.51	218.18	3.87
	Recorrido 2	183.07	1.37	184.44	21.82	3.35
	Recorrido 3	183.04	1.41	184.45	252.67	2.69
	<b>Promedio</b>	<b>184.38</b>	<b>1.42</b>	<b>185.80</b>	<b>164.22</b>	<b>3.23</b>

Las emisiones de HC's no se toman en cuenta en el análisis debido a que estas emisiones no están representadas por un compuesto definido y por lo tanto, no se cuenta con una fórmula molecular específica que nos permita

calcular el % en peso de carbono en estos compuestos. Sin embargo, el hecho de que no se tome en cuenta la generación de HC's nos genera un error menor al 3%.

Para las pruebas cortas, el camión a GNC consume 20.89 % más combustible que el diesel, mientras que para los recorridos largos el GNC consume un 27.91% más que el diesel.

La diferencia en el consumo de combustible se debe principalmente a la menor densidad energética de GNC / BGC con respecto al diesel: El GNC / BGC contiene aproximadamente 24,000 BTU/galon contra 140,000 BTU/galon del diesel (Krich et al., 2005).

El hecho de que se presente un mayor consumo de combustible por parte del GNC / BGC no significa que éste se encuentre en desventaja con respecto al diesel. Esto se debe a que, para el febrero del 2010, el costo del GNC fue de \$5.57/Leq mientras que el del diesel fue de \$8.32/L (Gazel, 2010). Esto le da una ventaja en costo al GNC del 33% por litro con respecto al diesel.

Para generar un panorama más claro de la ventaja económica del GNC con respecto al diesel se lleva a cabo un recorrido supuesto de 100 km, y se determina el combustible consumido y costo involucrado en ese recorrido. Esto se muestra en la Tabla 5.8.

**Tabla 5.8. Consumo y costo de combustible por la operación en 100 km de recorrido.**

	Litros / 100 km	Costo (\$)
Recorridos Cortos a GNC	37.44	208.55
Recorridos Largos a GNC	39.62	220.66
Diesel	30.97	257.68

Como se puede ver, para recorridos cortos se obtiene un ahorro de \$49.13 cuando se opera un camión a GNC con respecto al diesel. Además, si tomamos en cuenta que el promedio de velocidad de las pruebas a GNC fue mayor que el del diesel, entonces se esperaría que cuando el promedio de velocidad para las dos pruebas sea el mismo, se genere una reducción en el consumo de combustible, lo que redundaría en una baja en emisiones de CO<sub>2</sub> y en un mayor ahorro económico.

En lo que respecta a los recorridos largos, se obtiene un ahorro de \$37.01 cuando se opera un camión a GNC en recorridos largos con respecto al diesel. Esto nos indica que aún en recorridos largos, en donde el consumo de combustible es mayor, el GNC sigue generando ahorros económicos respecto al diesel. Además, si los promedios de velocidad fueran los mismos, seguramente se produciría un menor consumo de combustible que generaría una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> y un ahorro económico aún mayor.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

De acuerdo con la hipótesis planteada, las emisiones de la mayoría de los contaminantes - a excepción de HC's - disminuyeron de forma significativa cuando se opera un camión a GNC (BGC) con respecto a uno a diesel bajo el mismo tipo de recorrido (recorridos cortos). Comparando las emisiones generadas por los combustibles para los recorridos cortos se tiene lo siguiente:

- El GNC emite 0.5 % más de CO<sub>2</sub> que el diesel.
- El diesel emite 425.0% más de CO que el GNC.
- El diesel emite 56.1 % más de NOx que el GNC.
- El diesel emite 81.0 % menos de HC's que el GNC.
- El diesel emite 18.2 % más de PM<sub>10</sub> que el GNC.

De lo anterior, se puede ver que el grado de reducción de emisiones de CO y NOx fue sorprendente. Mientras que para las emisiones de PM<sub>10</sub> se tiene una reducción más discreta, aunque no dejar de ser considerable. Las emisiones de CO<sub>2</sub> para los recorridos cortos fueron prácticamente las mismas para los dos combustibles. Pero, se espera que las emisiones de CO<sub>2</sub> para el GNC sean menores que las del diesel cuando se tengan promedios de velocidad iguales. En lo que respecta a las emisiones de HC's, éstas no pueden ser tomadas en cuenta debido a una fuga de combustible en el camión. Así, en lo que respecta a las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO, NOx, PM<sub>10</sub>, generadas en recorridos cortos (sin inclinaciones considerables), el GNC (BGC) tiene una fuerte ventaja sobre el diesel

En lo que respecta a las emisiones generadas por medio de los recorridos largos a GNC, en los que el motor a chispa sufría un forzamiento mayor debido al sometimiento a pendientes pronunciadas, las emisiones de todos los contaminantes (con excepción de las  $PM_{10}$ ) aumentaron respecto a las generadas por los recorridos cortos de GNC. Así, comparando las emisiones generadas en los dos tipos de recorridos se tiene lo siguiente:

- Las emisiones de  $CO_2$  de los recorridos largos aumentaron 5.7% con respecto a los recorridos cortos.
- Las emisiones de  $NO_x$  de los recorridos largos aumentaron 2.3% con respecto a los recorridos cortos.
- Las emisiones de  $CO$  de los recorridos largos aumentaron 66.4% con respecto a los recorridos cortos.
- Las emisiones de  $HC's$  de los recorridos largos aumentaron 27.6% con respecto a los recorridos cortos.
- Las emisiones de  $PM_{10}$  de los recorridos cortos aumentaron 10.9% con respecto a los recorridos largos.

De acuerdo con los resultados anteriores, la eficiencia de combustión se ve afectada cuando el motor es sometido a un mayor forzamiento. Esto se ve reflejado claramente en el aumento considerable de las emisiones de  $CO$ . Además, las emisiones de  $PM_{10}$  se ven reducidas cuando el motor es sometido a un forzamiento mayor.

Dado lo anterior, deberá de analizarse la aplicación de un camión a gas en recorridos con pendientes pronunciadas. Principalmente, considerando el aumento considerable que se genera en las emisiones de CO.

Cuando se comparan las emisiones generadas por los recorridos largos a GNC con los recorridos a diesel se tiene lo siguiente:

- Las emisiones de CO<sub>2</sub> de los recorridos largos de GNC aumentan 6.2% con respecto al diesel.
- Las emisiones de CO del diesel aumentan 215.5% con respecto a los recorridos largos de GNC.
- Las emisiones de HC de los recorridos largos de GNC aumentan 131.5% con respecto al diesel.
- Las emisiones de NO<sub>x</sub> del diesel aumentan 52.5% con respecto a los recorridos largos de GNC.
- Las emisiones de PM<sub>10</sub> del diesel aumentan 31.1% con respecto a los recorridos largos de GNC.

El 6.2% de aumento de CO<sub>2</sub> del GNC con respecto al diesel puede parecer alto. Pero es obvio que los recorridos con pendientes generarán mayores emisiones que los recorridos que no tienen pendientes, por lo cual, este es un dato totalmente lógico. Además, dado que el promedio de velocidad para la prueba a GNC en recorridos largos fue mayor que el correspondiente al diesel, se espera que cuando los promedios de velocidad sean iguales el porcentaje de aumento de CO<sub>2</sub> se disminuya.

Por otro lado, el aumento tan severo en las emisiones de HC's por parte del GNC se debe a una fuga de combustible que llega al escape del vehículo. Esta fuga de combustible sin quemar, llega a los sensores de HC's del equipo Axion que no hacen más que medir y registrar valores tan altos en emisiones de HC's. Dado lo anterior, no se tienen que tomar en cuenta las emisiones de HC's generadas por el GNC en este estudio.

De acuerdo con los resultados, el GNC en recorridos largos genera menos emisiones de CO, NOx y PM<sub>10</sub> que el diesel. Por lo que se procede a recomendarlo en aplicaciones de ciclos de manejo con inclinaciones pronunciadas.

En lo que respecta al consumo de combustible, el GNC presenta un consumo mayor debido a su menor densidad energética con respecto al diesel. Este consumo se ve justificado ampliamente por un menor costo del GNC con respecto al diesel.

Los resultados obtenidos durante las experimentaciones indican claramente que el GNC ofrece ventajas sustanciales en emisiones y en costo con respecto al diesel. Así, una vez que sea identificado, analizado y corregido el problema de emisiones de HC, entonces seguramente todas las emisiones de contaminantes serán considerablemente más bajas que las correspondientes al diesel y por lo tanto, el GNC / BGC será mucho más recomendable que el diesel.

Aunque la implementación de una tecnología de biogás en transporte genere beneficios sustanciales al medio ambiente, generalmente el grado de inversión para una planta de producción de biogás acondicionado es alto. Además, cuando se hace el balance entre el costo extra de un auto a gas y los

ahorros en combustibles generados por el GNC, resulta que los ahorros en combustible no compensan el costo extra del vehículo a gas. Por lo tanto, si se pretende la implementación de esta tecnología en transporte, es necesario que se involucre el gobierno con el fin de que se genere un alto nivel de confianza y se generen incentivos para los conductores de autos a gas. Incentivos como los que se generan en Suecia y otros países de la Unión Europea, en donde la tecnología de biogás en transporte ha crecido de forma considerable a través de los últimos años.



## **7. ANEXO 1**

### **CONTAMINANTES GENERADOS POR EL SECTOR TRANSPORTE EN MÉXICO Y CICLO DE VIDA DEL BIOGÁS**

#### **7.1 Generación de contaminantes por transporte en México.**

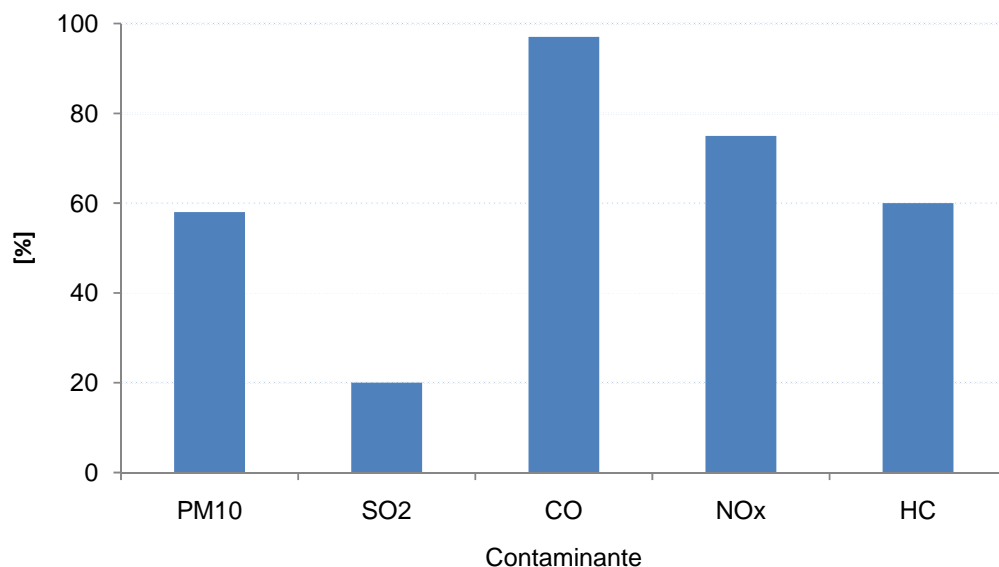
El 40% de la población urbana está expuesta a la contaminación del aire, siendo los niños, adultos mayores y personas enfermas las que más afectadas resultan por ésta exposición (SEMARNAT, 2010). En México el mayor generador de este tipo de contaminación es la operación cotidiana de los cerca de 23 millones de vehículos (NGVA, 2009). Esto debido a que la mayoría de éstos están concentrados en ciudades grandes y medias. Así, las emisiones contaminantes generadas por la operación de estos vehículos incluyen monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados o compuestos orgánicos volátiles (HC o VOC), óxidos de nitrógeno (NOx), y partículas suspendidas (PM).

Del total de generación de contaminantes atmosféricos en nuestro país, los automóviles contribuyen con (SEMARNAT, 2010):

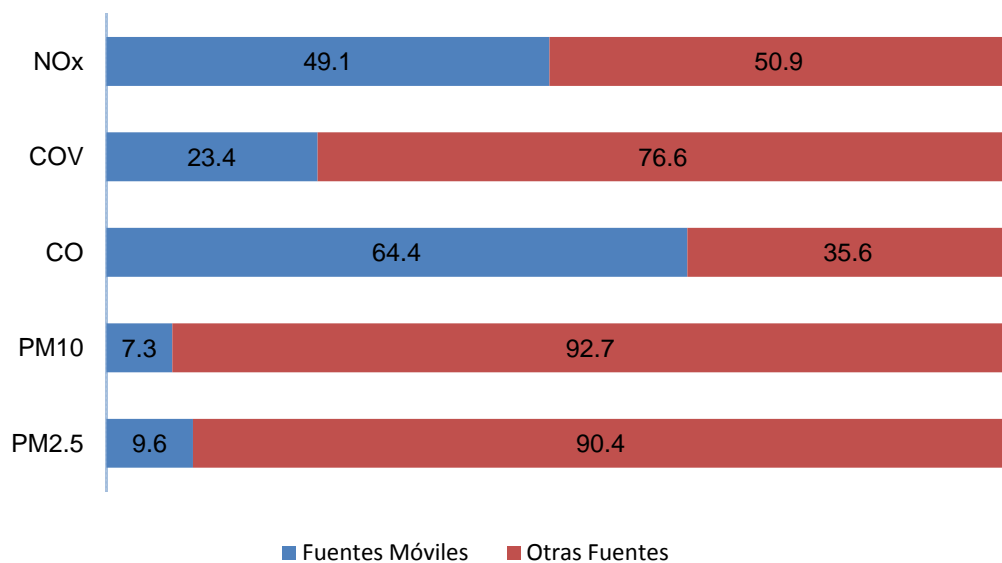
- 50 % de los hidrocarburos.
- 75 % de óxidos de nitrógeno.
- 95 % del monóxido de carbono.
- 60 % de partículas suspendidas.
- 25 % del níóxido de azufre.

Los porcentajes de generación de éstos contaminantes por parte del sector transporte se pueden observar mejor en las Figuras 7.1 y 7.2.

**Figura 7.1 Contribución por el sector transporte a las emisiones totales de contaminantes atmosféricos en México (SEMARNAT, 2010).**



**Figura 7.2 Contribución por el sector transporte a las emisiones totales de contaminantes atmosféricos en México (SEMARNAT, 2010).**



La generación de estas emisiones es totalmente dependiente de los combustibles utilizados y del diseño de los vehículos; además, está previsto que el nivel de estas emisiones aumente. Se tienen claras predicciones que

indican que el transporte, a nivel global, crecerá rápidamente hasta el año 2050. Esto supondrá duplicar la demanda de combustibles y prácticamente la generación de emisiones globales internacionalmente hablando desde ahora hasta el año 2050 (UNEP, 2007).

Además de lo anterior, se tiene contemplado que las emisiones contaminantes generadas por el sector transporte aumenten debido a la pobre calidad de los combustibles, a un aumento en la demanda de los mismos y sobre todo a que los vehículos que se encuentran actualmente en circulación en el Valle de México muchas veces son obsoletos en comparación con la matrícula que circula en los países desarrollados (UNEP, 2007). Por lo tanto, es necesaria la generación de programas y leyes que nos permitan actuar de manera urgente para dar solución a los problemas de contaminación del aire. En caso de que no se adopten este tipo de medidas, dichos problemas de generación de contaminantes atmosféricos están predestinados a empeorar, generando así, un fuerte deterioro ambiental y un incremento en el deterioro de la salud de las personas que habitan en zonas urbanas.

Contrario a lo que sucede en nuestro país, en los países desarrollados las emisiones contaminantes se han reducido en las últimas décadas. La principal contribución a este hecho ha sido la introducción de combustibles más limpios. Tales como la gasolina sin plomo, el diesel ultrabajo en azufre (DUBA) o la introducción de biocombustibles como el biogás, el bioetanol o el biodiesel. Así mismo, otro factor que contribuye al mejoramiento de la calidad del aire es la introducción de mejores tecnologías de motor y de dispositivos de post-tratamiento como los convertidores catalíticos, filtros, etc. Este es el camino que se tiene que seguir en países subdesarrollados como México, en

los que la calidad del aire es baja y genera problemas severos de salud y sociales.

## **7.2 Reducción de contaminantes generada por el empleo de biogás en transporte.**

De acuerdo con un estudio realizado en 1998 por la Agencia Internacional de Energía, el biogás es el combustible más limpio en lo que respecta a calidad del aire y mitigación del cambio climático en comparación con los combustibles fósiles, el biodiesel y el bioetanol (IEA, 2007).

Según el estudio, la combustión del biogás tiene un valor de toxicidad 70 % menor que el correspondiente a los combustibles fósiles, y el potencial de formación de ozono se ve reducido entre 60% y 80%. Así mismo, se monitoreó la operación de motores similares operando con biogás, diesel y gasolina, obteniéndose resultados que indican que se tiene una reducción de 57 % en emisiones de NOx mediante el uso de biogás en comparación con la gasolina y de 88 % en comparación con el diesel. Además, este mismo estudio indica que se pueden llegar a tener virtualmente cero emisiones de compuestos cancerígenos (IEA, 2007).

De la misma forma, otro estudio realizado en el año 2000 por la Autoridad en Transporte Público y Tráfico de Suecia, comparó la operación de un autobús a partir de BGC contra la operación del mismo autobús a partir de diesel. Los datos generados a partir de la comparación se muestran en la Tabla 7.1. A partir de dicha tabla se puede concluir que cuando operamos por medio de BGC, las emisiones en monóxido de carbono (CO) se reducen en un 60 %, las de hidrocarburos (HC) en un 12.5 %, las de oxidos de nitrógeno (NOx) en

44 %, las de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en 79 % y las de partículas suspendidas (PM) en un 85 % (Alexandersson, 2003).

Aunque las cifras de emisiones de NOx y PM mostradas en la Tabla 7.1 para el BGC son muy bajas en comparación con las del diesel, éstas no cumplen con el límite fijado por la norma Euro V de 0.280 g/km para el NOx, y 0.005 g/km para PM (DieselNet, 2010). Esto es obvio, ya que en el año 2000 - año en el que se llevó a cabo el estudio - se emitió la Norma Euro 3, la cual era menos estricta en cuanto a emisiones de NOx y de partículas que la norma que se encuentra actualmente en vigencia, la Euro V. En este sentido, la norma Euro V es la norma más estricta en lo que a emisiones vehiculares se refiere. Dicha norma se aplica solamente en la UE, por lo cual, hablando de forma estricta, no tendría que hablarse de ella. Pero si queremos reducir de manera considerable las emisiones de contaminantes atmosféricos y de GEI en nuestro país, entonces se tendrían que aplicar en México normas similarmente estrictas.

Aunque las emisiones generadas por la quema de BGC son considerablemente menores que las generadas por la operación con diesel (Tabla 7.1), el hecho de que estas emisiones puedan estar un poco por encima del límite establecido por la Euro V representa un problema. Por lo tanto, para dar solución a este problema y lograr estar dentro de los límites fijados por la Euro V, se tendrían que aplicar a los vehículos un sistema de recirculación de gases de escape, o en el caso de los autos con motor Otto (gasolina) aplicar un convertidor catalítico de 3 vías (mecanicavirtual, 2009). Según un estudio realizado por la Asociación Internacional de Energía (IEA) sobre motores de gas que cuentan con controles catalíticos, se demostró que éstos motores

muestran mejores niveles de emisiones que los más modernos motores diesel que cumplen con la Euro V, probados bajo el Ciclo Europeo de Tránsito (ETC) o el estándar Mejor Ambiental de Vehículos (EEV) (Persson et al.,2006).

**Tabla 7.1 Comparación entre las emisiones generadas el diesel contra las generadas por el biogás.**

	Unidades	CO	HC	NOx	CO <sub>2</sub>	Partículas
Diesel	g/km	0.2	0.4	9.73	1053	0.1
Biogás	g/km	0.08	0.35	5.44	223	0.015

Fuente:(Alexandesrsson, 2003)

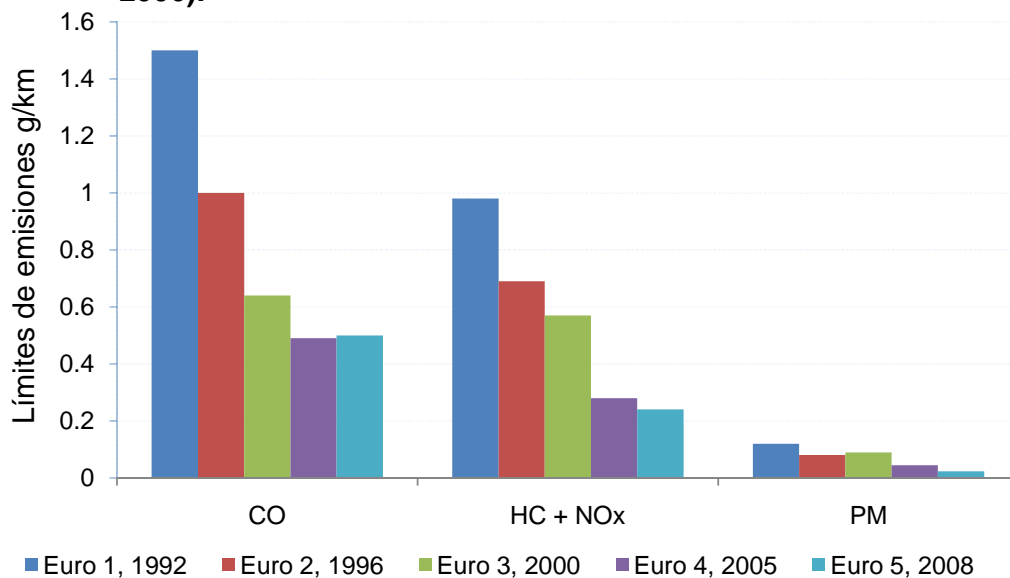
Con el objeto tener una idea clara del porcentaje de reducción de los contaminantes que se genera a través de la operación de los autos por medio de BGC, se tomó en cuenta otro estudio llevado a cabo por la Sociedad Nacional Para el Aire Limpio y la Protección del Ambiente del Reino Unido (National Society for Clean Air and Environmental Protection). En dicho estudio se publican datos de emisiones de contaminantes concernientes a autos ligeros correspondientes a la gama de vehículos ligeros de la empresa Volvo, operados por medio de GNC. Las emisiones para el volvo S60 presentan cifras de emisión de NOx de 0.017 g/km, HC+ NOx combinados de 0.08 g/km y 0.588 g/km de CO (las emisiones de PM no son medidas) (NSCA, 2006). Todas estas cifras de emisión, incluyendo las correspondientes a los NOx cumplen y de manera cómoda con los límites de emisión establecidos por el estándar Euro V para cada uno de los contaminantes mencionados.

Si comparamos los dos estudios analizados, podemos ver claramente que el segundo estudio presenta cifras de emisión de contaminantes mucho menores que las correspondientes al primer estudio. El hecho de que los datos generados por el estudio de la Autoridad en Transporte Público y Tráfico de

Suecia no cumplan con los límites de emisiones para NOx establecidos por la Euro V y los generados por el estudio de la Sociedad Nacional Para el Aire Limpio y la Protección del Ambiente del Reino Unido si, se debe a que el primer estudio se llevó a cabo 6 años antes que el segundo. Por lo anterior es válido suponer que los autos Volvo empleados para el análisis en el segundo estudio ya contaban con las tecnologías más adecuadas para la reducción de emisiones.

De acuerdo con los estudios analizados, queda demostrado que las emisiones de contaminantes que se generan por la quema de BGC en un motor de combustión interna son sustancialmente menores a las generadas por la quema de combustibles fósiles. Además, dichas cifras de emisiones cumplen con las normas internacionales más estrictas en lo que a emisiones de contaminantes se refiere.

**Figura 7.3 Límites de emisiones de contaminantes fijados por la Norma Euro para vehículos diesel en sus diferentes versiones. (NSCA, 2006).**



### **7.3 Ciclo de Vida de Emisiones del Biogás como combustible para transporte.**

La cadena total de producción de BG incluye varias etapas en las que se utiliza energía. Obviamente, dicho empleo de energía implica un aumento directo en las emisiones. Como ejemplos de dichas entradas de energía en el proceso global de DA tenemos la recolección y selección de los diferentes tipos de desechos sujetos a la DA, así como el transporte de los desechos de la fuente a la planta de tratamiento, la aplicación de los productos de digestión (fertilizante), la operación de la planta de BG y el acondicionamiento del BG cuando éste es usado como combustible para transporte (Börjesson, 2007). Por otro lado, se asume que el calor requerido en el proceso de producción de BG, es producido a partir del mismo BG. Así mismo, se asume que la energía eléctrica requerida dentro del proceso es generada a partir de GNC, de acuerdo a las condiciones de funcionamiento de las plantas suecas actuales.

Una vez que el BG está listo para ser empleado como combustible en transporte, éste es quemado dentro del motor de combustión interna de un auto. Esta combustión genera las llamadas emisiones de uso final del BGC. En este sentido, los vehículos de gas en los que se realiza la combustión del BGC tienen una eficiencia de conversión de 0.19, siendo esta eficiencia 10% más alta que la correspondiente a los vehículos impulsados con gasolina (Börjesson, 2007).

El Ciclo de Vida de Emisiones (CVE) de un combustible es definido como las emisiones totales generadas a partir de la producción y el uso final del mismo. Dentro del ciclo de emisiones del biogás, se considera que las pérdidas de CH<sub>4</sub> en los sistemas de producción son mínimas. Sin embargo,



altas pérdidas de CH<sub>4</sub> se pueden generar debido a los defectos en tecnología (pérdidas incontroladas), o limitaciones en la utilización del BG producido para propósitos de energía (perdidas controladas) (Börjesson, 2007). Según la experiencia, un adicional 10-15 % de BG puede ser producido durante el almacenamiento de los productos de la DA, este gas puede ser perdido cuando los tanques de almacenamiento post - digestión son abiertos. Así mismo, pérdidas de CH<sub>4</sub> pueden también ocurrir durante el proceso de acondicionamiento y en la presurización, en el caso de que el BG sea empleado como combustible para transporte. Dichas pérdidas de CH<sub>4</sub> deben de evitarse al máximo por que incluso, pérdidas moderadas de CH<sub>4</sub> pueden contribuir potencialmente al calentamiento climático global. Esto debido a que el CH<sub>4</sub> es 21 veces más potente como gas de efecto invernadero que el CO<sub>2</sub>. En este caso, las pérdidas incontroladas de CH<sub>4</sub> son estimadas en un 2% cuando el BG es acondicionado y usado como combustible para transporte. Dicho valor se estimó en base a la experiencia sueca (Börjesson, 2007).

Para obtener datos sobre el Ciclo de Vida del Biogás, se tomó en cuenta un estudio realizado por la Sociedad Nacional Para el Aire Limpio y la Protección del Ambiente del Reino Unido (National Society for Clean Air and Environmental Protection, 2006). En dicho estudio se presentan los datos pertinentes al Ciclo de Vida de Emisiones de CO<sub>2</sub> del BG comparado con otros combustibles para transporte como el diesel, la gasolina, el biodiesel y el bioetanol. Los datos generados por este análisis fueron aplicados a autos ligeros (autos convencionales y Vans) y a autos pesados (autos pesados convencionales y autobuses) (NSCA, 2006).

Según el estudio, para determinar el Ciclo de Vida de Emisiones completo ó pozo a llanta (WTW), es decir, toda la energía y emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el proceso de producción y combustión del BG dentro del motor de combustión interna, el autor se basó en los siguientes análisis (NSCA, 2006):

- Balance pozo a tanque (WTT), que determina los requerimientos de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por la producción del BG. También se define como la energía gastada por unidad de energía contenida en el combustible.
- Balance tanque a llantas (TTW), que es la energía consumida por unidad de distancia cubierta por el vehículo.

De esta forma, las cifras de emisiones calculadas de GEI con este proceso representan los gramos totales de CO<sub>2</sub> equivalentes emitidos en el proceso de entrega de 10 km de operación de los vehículos. Así mismo, los autos analizados por el estudio fueron los siguientes (NSCA, 2006):

- Auto convencional de gasolina y diesel.
- Auto de GNC con motor estequiométrico de chispa de ignición
- GNL aplicado a un motor dual combustible diesel / GN.
- Biogás generado a partir de desechos municipales, estiércol líquido y estiércol seco aplicado a un motor estequiométrico de chispa de ignición.
- 100 % y una mezcla 95:5 de etanol generado a partir de la remolacha del azúcar, aplicado a un autos con motor de chispa de ignición.

La energía consumida por unidad de distancia calculada en el estudio para cada una de las categorías de vehículos es mostrado en la Tabla 7.2. En dicha tabla se puede observar de manera clara la diferencia en eficiencia entre motores diesel (ignición por compresión) y gasolina (chispa de ignición), siendo el motor diesel 15% más eficiente. Así mismo, en esta tabla también se muestra la diferencia en el contenido energético del combustible. Por ejemplo, es necesaria una cantidad considerablemente mayor de etanol que de diesel para manejar la misma distancia. Esto se debe al bajo contenido energético del etanol. Todos estos factores afectarán el total del uso de la energía WTW y por lo tanto, las emisiones del vehículo.

**Tabla 7.2 Consumo de combustible para cada una de las categorías autos estudiadas.**

	Consumo de Combustible (kg / 100km)				
	Ligeros	Pesados	Autobus		
Gasolina	6.93	---	---		
Diesel	5.95	31.40	44.84		
GNC (Mezcla Europea)	6.19	34.65	48.28		
BGC RSU	6.19	34.65	48.28		
BGC Estiércol Líquido	6.19	34.65	48.28		
BGC Estiércol Seco	6.19	34.65	48.28		
Diesel / GN	Dual combustible	Diesel	---	2.65	---
		GNC	---	25.38	---
95/5 Etanol		7.06	---	---	
100% Etanol		10.96	---	---	

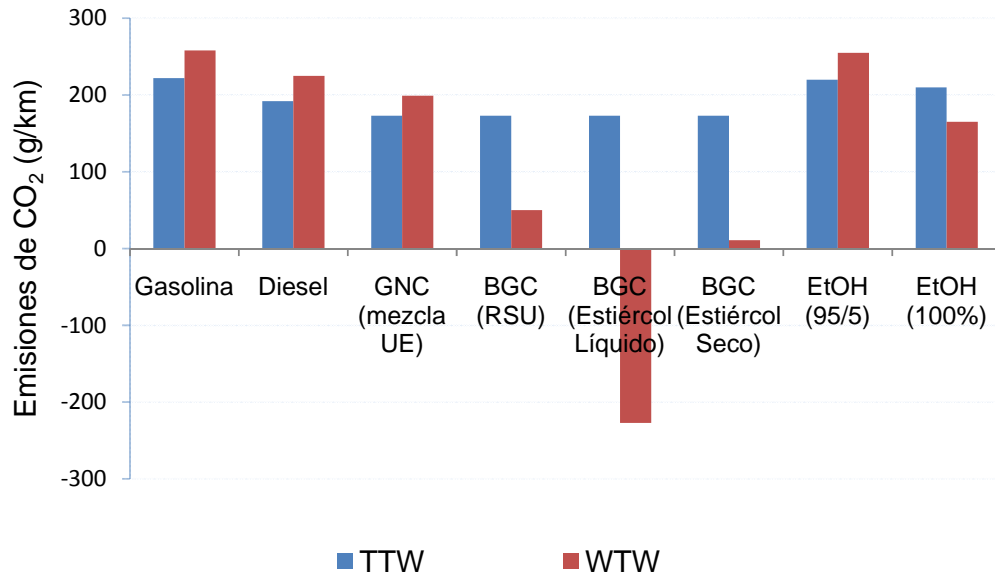
Fuente:(NSCA, 2006)

Los resultados de los cálculos de emisiones para cada una de las categorías de autos son mostrados de las Figuras 7.4 a la 7.7. Las Figuras comparan las emisiones WTT y TTW para cada uno de los combustibles,

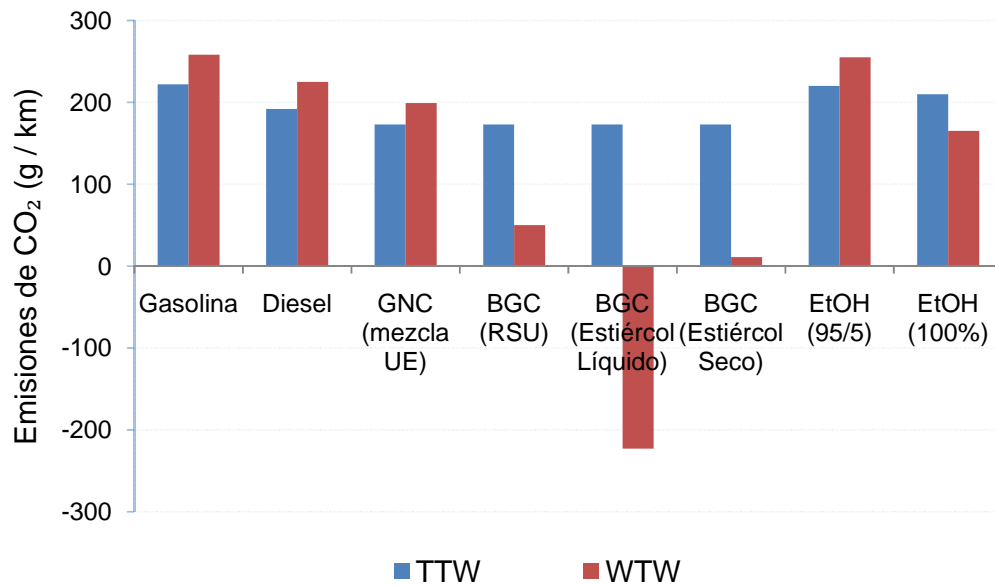
permitiendo que sean vistos los impactos relativos de cada una de los lados del ciclo de vida (NSCA, 2006). El panorama total en todos los cuatro casos es similar; como era de esperarse, de acuerdo a la base TTW, las emisiones de escape de gases de efecto invernadero dan a los vehículos de CH<sub>4</sub> una ligera ventaja sobre los autos diesel y biodiesel, y una mayor ventaja sobre los autos de gasolina y etanol. Por otro lado, en lo que respecta a la reducción en emisiones de gases de efecto invernadero del análisis WTW, comparando al diesel con otros combustibles, se obtuvieron ahorros en emisiones del 30% en bioetanol, 50% para biodiesel y de 75% a 200% para biogás (NSCA, 2006). En este caso, la cifra de 200% que es considerablemente mayor a las otras, corresponde al proceso global de DA que involucra la digestión de estiércol líquido. La principal razón de la reducción es que el hecho de no tratar el estiércol líquido genera altas emisiones de CH<sub>4</sub>, que es uno de los gases de efecto invernadero más potentes. Así, el procesamiento del estiércol para generar BG para uso en vehículos no sólo reemplaza las emisiones generadas por la quema de combustibles fósiles, si no que también se remueven una fuente importante de emisiones de CH<sub>4</sub> y por lo tanto se obtiene un doble beneficio (NSCA, 2006).

A manera de conclusión, se puede decir que el BG empleado en vehículos da una reducción considerable en emisiones de gases de efecto invernadero comparado tanto con combustibles fósiles como con otros biocombustibles.

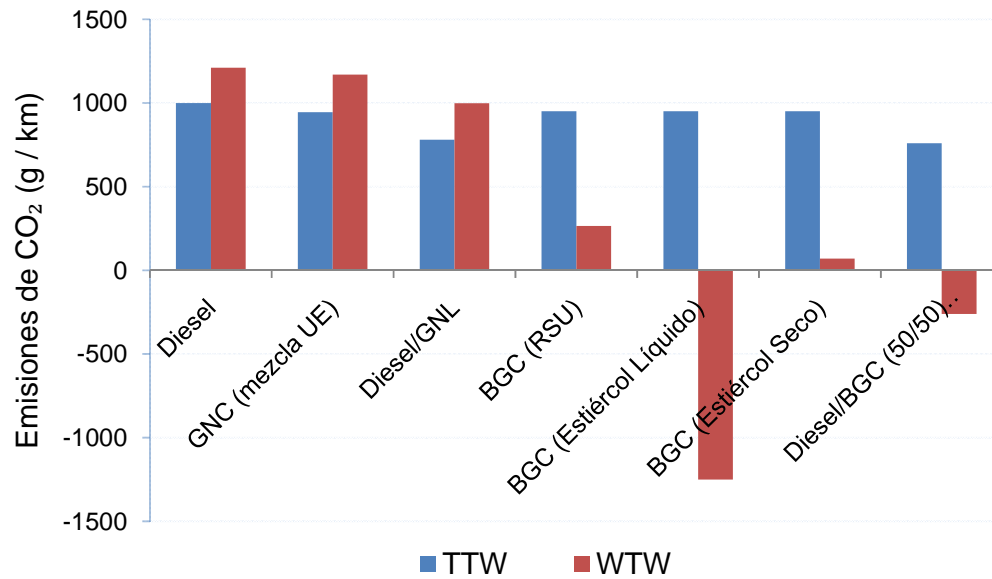
**Figura 7.4 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para un auto de pasajeros 1.6 L (NSCA, 2006).**



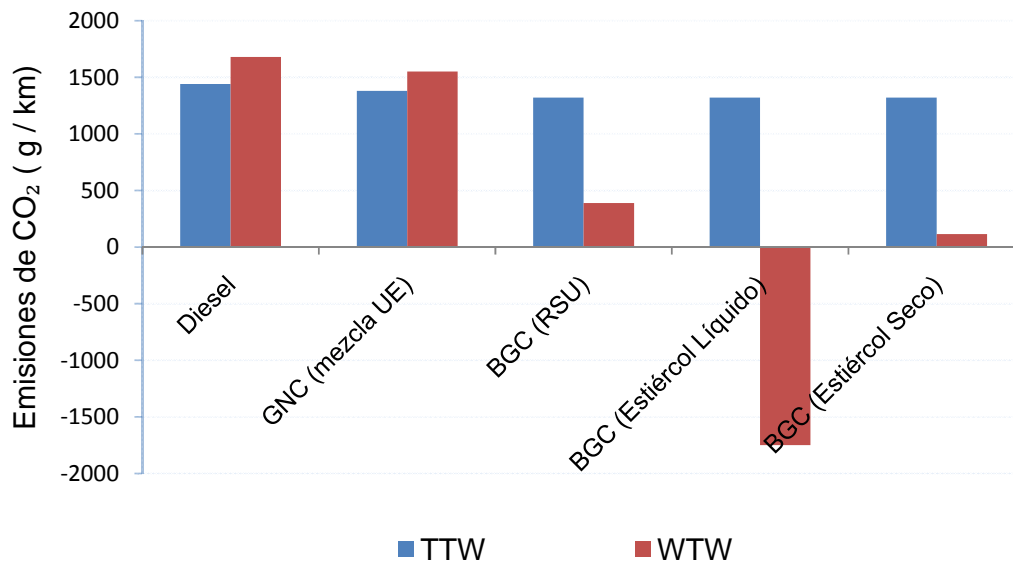
**Figura 7.5 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para vehículos de ligeros (NSCA, 2006).**



**Figura 7.6 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para vehículos genéricos de servicio pesado de 38 toneladas. (NSCA, 2006).**



**Figura 7.7 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para autobuses (NSCA, 2006).**



## **8. ANEXO 2**

### **TECNOLOGÍAS Y PROCESOS EXISTENTES PARA EL ACONDICIONAMIENTO DEL BIOGÁS**

Dentro del proceso global de aplicación de biogás en transporte, es muy importante la eliminación de ciertos compuestos para que éste pueda llegar a tener una composición similar a la del GNC. Así, este anexo se enfoca a la explicación de las tecnologías y procesos existentes para la eliminación de estos compuestos contaminantes.

#### **8.1 Remoción de CO<sub>2</sub>.**

La remoción del CO<sub>2</sub> del biogás lo enriquece en CH<sub>4</sub>, proporcionando mucho mayores distancias de manejo con un volumen de almacenamiento fijo. Con esto se logra una consistencia energética del biogás.

En la actualidad son empleados principalmente cuatro métodos de remoción de CO<sub>2</sub> con el fin de lograr que el biogás cumpla con los estándares para emplearse como combustible para vehículos, dichos métodos son (Persson et al.,2006):

- Absorción con agua.
- Absorción con polietilenglicol.
- Tamices de carbón molecular.
- Membranas de separación.

##### **8.1.1 Absorción con agua.**

El lavado con agua a alta presión es una técnica basada en la absorción física por medio de la disolución de gases en un medio líquido, en este caso

agua. El proceso se lleva a cabo debido a que la solubilidad del  $\text{CO}_2$  y del  $\text{H}_2\text{S}$  en agua es mucho más alta en comparación con la del  $\text{CH}_4$  (Wheeler, 2005). Esta técnica de remoción de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  es la más común y se emplea en la mayoría de las plantas de acondicionamiento de biogás de todo el mundo.

Debido a que la solubilidad de  $\text{CO}_2$  se incrementa de forma proporcional con la presión, el biogás es presurizado típicamente a presiones entre 150 – 300 psig mediante un compresor de dos etapas (Krich et al., 2005). Un esquema representativo del proceso se muestra en la Figura 8.1.

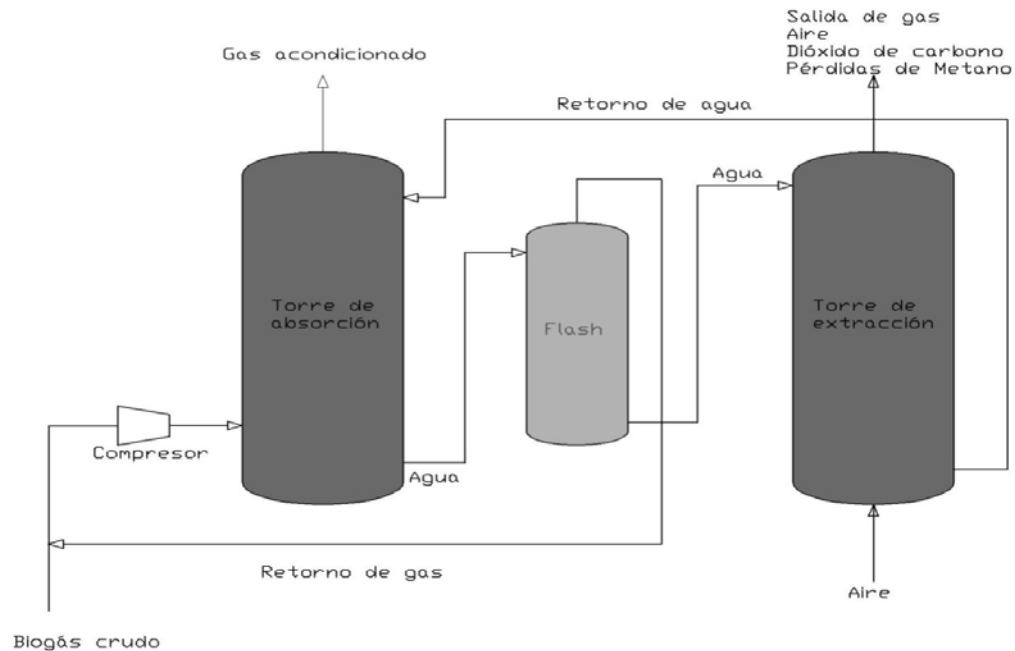
Una vez que el biogás ha sido presurizado, se alimenta al fondo de la columna de absorción. Dicha columna está empacada con el fin de aumentar el área de contacto entre las dos fases. Así mismo, el agua es alimentada por el domo, ocurriendo así un flujo en contra corriente (DMT, 2009). La corriente gaseosa de salida es mucho más rica en  $\text{CH}_4$  debido a que el agua absorbió una buena parte del  $\text{CO}_2$ . A su vez, la corriente de salida de agua es llevada a un tanque separador (flash) con el fin de recuperar el metano disuelto en la corriente. Dentro del tanque flash el gas es regenerado por despresurización y llevado de nueva cuenta a la corriente gaseosa de entrada a la columna de absorción (Wheeler, 2005). La corriente de agua que sale del tanque flash es llevada a una columna empacada en donde el agua entra en contacto con el aire, causando que el  $\text{CO}_2$  se desorba, en tanto que el gas de salida de la columna de desorción además de contener  $\text{CO}_2$ , contiene una fracción pequeña de  $\text{CH}_4$  que se perdió durante todo el proceso.

Mediante este proceso se pueden obtener como producto corrientes de biogás con una composición en metano del 95% o más (Krich et al., 2005). En



este sentido, han sido instaladas varias unidades de lavado en diversos países que tienen capacidades que varían entre 75-800 m<sup>3</sup> biogás/h (Eliasson, 2005).

**Figura 8.1 DFP del proceso de absorción de CO<sub>2</sub> con agua (Nozic, 2006).**



Es importante mencionar que antes de que se lleve a cabo este proceso, es necesario haber llevado a cabo de manera previa una remoción del H<sub>2</sub>S. Esto debido a que el H<sub>2</sub>S puede reducir drásticamente el tiempo de vida de los compresores y otros equipos involucrados en el proceso. Por otro lado, el proceso se puede hacer más eficiente cuando el agua no se recircula a la columna de absorción. Este proceso es ampliamente usado en el acondicionamiento del biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales debido a que cuentan con una gran disponibilidad de agua y por lo tanto no es necesaria la regeneración de la misma (Wheeler, 2005).

### **8.1.2 Absorción con polietilenglicol.**

Éste es un proceso muy parecido al de absorción con agua, en el que se lleva a cabo la remoción de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  por el proceso físico de absorción. La diferencia es que el absorbente no es agua, sino polietilenglicol. El  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{S}$  presentan una solubilidad mucho más alta en polietilenglicol que en agua, de esta forma, se requiere una menor cantidad de absorbente y bajos bombeos de recirculación. Por medio de este proceso, además del  $\text{CO}_2$  son eliminados otros compuestos como agua e hidrocarburos halogenados (contaminantes en biogás obtenido a partir de RSU) (Wheeler, 2005).

El polietilenglicol es regenerado con vapor, no recomendando que se lleve a cabo la extracción con aire debido a la formación de azufre elemental que causa problemas operacionales. Sin embargo, sí es posible usar un gas inerte (Persson, et al., 2006).

### **8.1.3 Proceso PSA.**

El proceso de adsorción de oscilación de presión, o PSA es un proceso en el que se separa el  $\text{CO}_2$  del  $\text{CH}_4$  a través de zeolitas o carbón activado a diferentes niveles de presión. Una ventaja importante de este proceso es que por medio de los tanques de adsorción se logran remover, a parte del  $\text{CO}_2$ , otros compuestos como  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{H}_2\text{S}$  (DMT, 2009).

Este método utiliza una columna rellena con un tamiz molecular para la absorción diferencial de los gases, de manera que el  $\text{CO}_2$  se absorbe preferentemente, dejando pasar fácilmente al  $\text{CH}_4$ . La selectividad de adsorción se logra mediante diferentes tamaños de malla y/o por aplicación de diferentes

presiones de gas, aunque el proceso es operado bajo presiones moderadas (Wheeler, 2005).

Con el propósito de reducir el consumo de energía de compresión, una serie de tanques (generalmente 4) son enlazados y operados de manera secuencial (Figura 8.2), así la presión del gas liberada de un tanque es provechada por otros tanques. La primera columna limpia el gas crudo en alrededor de 90 psi a un biogás acondicionado con una presión de vapor de menos de 10 ppm H<sub>2</sub>O y un contenido de CH<sub>4</sub> del 96 % o más. En la segunda columna, la presión de 90 psi es relevada por primera vez a aproximadamente 45 psi de presión por comunicación con la cuarta columna, que fue previamente des - gasificada por un vacío. La presión en la segunda columna se reduce entonces a la presión atmosférica y el gas liberado fluye de vuelta al digestor, de modo que el CH<sub>4</sub> se pueda recuperar. La tercera columna es evacuada de aproximadamente 15 a 1 psi (Krich et al., 2005). Así, cada uno de los cuatro tanques adsorbedores opera bajo un ciclo alternativo de adsorción, regeneración y presurización.

Durante la fase de adsorción, el biogás es alimentado por el fondo de una de las columnas de adsorción, en donde el CO<sub>2</sub> es adsorbido. El gas que deja el domo de la columna contiene generalmente más de 96% de CH<sub>4</sub>. El gas desorbido está compuesto fundamentalmente de CO<sub>2</sub> y es normalmente ventilado a la atmósfera a pesar de que contiene algo de metano residual. Así, justo antes de que el material de adsorción se encuentre saturado con CO<sub>2</sub> y otras impurezas, la operación de la columna de adsorción es detenida con el fin de enviarla a la fase de regeneración. En el momento que eso pasa, otra

columna de adsorción comienza a operar, obteniendo así, una operación continua (DMT, 2009).

El material de adsorción es regenerado a través de una reducción de presión llegando hasta el vacío (Persson et al., 2006). Liberando así los compuestos removidos del biogás, que en este caso es principalmente CO<sub>2</sub>.

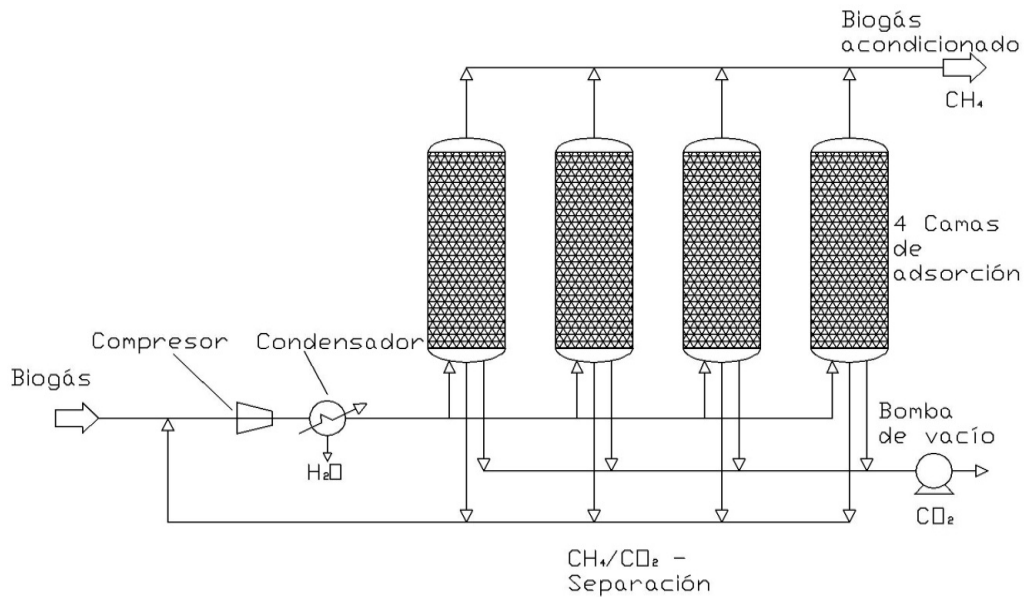
Para que este proceso se lleve a cabo de forma óptima, es necesario que el biogás esté seco y que no contenga H<sub>2</sub>S, debido a que éste gas se adsorbe de manera irreversible. Para esto, el vapor de agua es condensado y removido del biogás mediante un condensador, mientras que el H<sub>2</sub>S es removido generalmente mediante un tanque adicional de carbón activado. En éste tanque, el material adsorbente es relevado una vez que su superficie está saturada de H<sub>2</sub>S (Persson et al., 2006).

Una de las principales ventajas de este proceso es el alto porcentaje de CH<sub>4</sub> que se logra en la corriente de salida, así como el bajo nivel de emisiones y desechos. Aunado a esto, también se logra la remoción o adsorción de otros componentes como el N<sub>2</sub> y el O<sub>2</sub>. Además, aunque el proceso de regeneración del material adsorbente tiene un consumo alto de energía de calentamiento, esto es compensado por la baja demanda de energía requerida en el sistema de compresión (DMT, 2009).

En Suecia han sido construidas unidades de entre 15 y hasta 350 m<sup>3</sup> / h, y las experiencias de operación han sido generalmente buenas. En este sentido, el proceso de adsorción química representa una buena opción para el tratamiento del biogás debido a que se tienen pérdidas mínimas de CH<sub>4</sub>. Además, el biogás producido es más rico en CH<sub>4</sub> que el producido por otras tecnologías, por ejemplo el lavado con agua. Sin embargo, el proceso requiere

de una mayor sofisticación y mayores controles de proceso, incluyendo cuidado con la fracción de recirculación, ya que se pueden presentar mayores pérdidas de  $\text{CH}_4$  (Krich et al., 2005).

**Figura 8.2 DFP simplificado del proceso de adsorción con tamices de carbón (Wheeler, 2005).**



#### 8.1.4 Membranas.

Existen dos sistemas básicos de purificación de gas con membranas: separación de gas a alta presión con fase gaseosa en ambos lados de la membrana y separación de gas a baja presión de gas, con absorción por un líquido por el otro lado de la membrana.

Separación a alta presión: Antes de que el biogás sea acondicionado mediante su paso a través de la membrana, es necesario que pase a través de una cama de carbón activado con el fin de remover el  $\text{H}_2\text{S}$ , hidrocarburos halogenados o vapor de la corriente cruda generada en el biodigestor. Después de la cama de carbón activado, la corriente de biogás es pasada a través de un filtro de partículas y de un calentador (Wheeler, 2005).

Una vez removidos los compuestos antes mencionados, el biogás es presurizado a 36 bares y es hecho pasar a través de membranas generalmente poliméricas. Dichas membranas presentan la ventaja de que los gases se disuelven o se difunden a través de los materiales poliméricos. De esta forma, si es establecida una diferencia de presión a través de los lados opuestos de la membrana entonces ocurrirá un transporte de moléculas a través del material polimérico. Cuando una corriente de biogás que contiene  $\text{CO}_2$  es alimentada a la membrana, el  $\text{CO}_2$  permeará a través de la membrana mucho más rápido que el  $\text{CH}_4$ . Por lo tanto, la corriente presurizada de biogás alimentada, es separada en una corriente rica en  $\text{CO}_2$  y otra rica en  $\text{CH}_4$  (DMT, 2009).

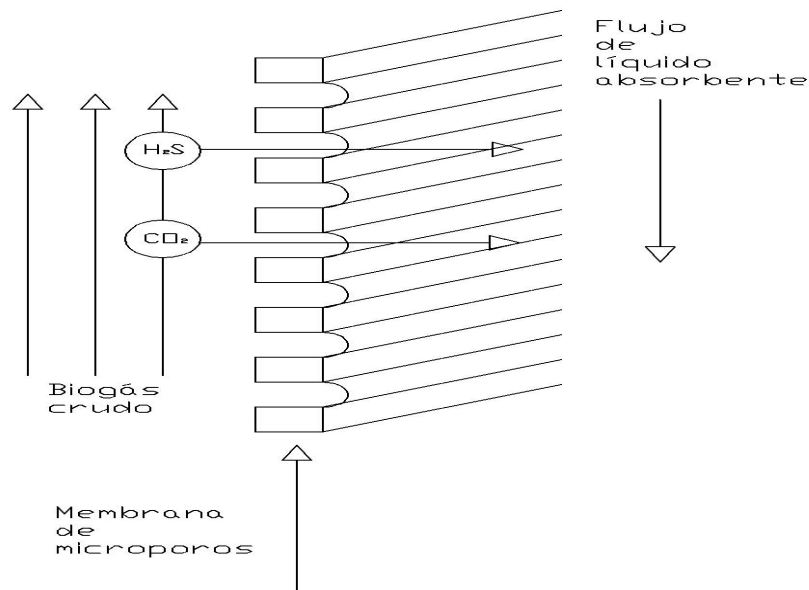
Por medio de este método, el biogás es generalmente acondicionado a un 96% de  $\text{CH}_4$  y el proceso es llevado a cabo generalmente en tres etapas, en donde el gas de desecho de las primeras dos etapas puede ser recirculado y el  $\text{CH}_4$  puede ser recuperado. El gas de desecho de la tercera etapa es generalmente quemado conteniendo todavía de un 10 a un 20% de  $\text{CH}_4$  (Wheeler, 2005).

Las membranas empleadas en este tipo de procesos tienen una vida útil de hasta 3 años y son específicas para el tipo de compuesto que se desee separar. En este sentido, la eficiencia del proceso global dependerá del tipo de membrana que se elija, ya que de esto dependerán factores importantes de proceso, tales como la permeabilidad, el tiempo de vida, la temperatura de operación, los costos de mantenimiento, entre otros (DMT, 2009).

Membranas de absorción gas – líquido: En este caso, el elemento principal del proceso es una membrana hidrofóbica de microporos que separa la fase líquida de la gaseosa. Las moléculas del gas siguen una dirección, y las moléculas de

CO<sub>2</sub> se difunden a través de la membrana y son absorbidas en el otro lado de la membrana por el líquido (solución de amoniaco) que circula a contra corriente con respecto a la corriente de gas (Figura 8.3). La ventaja que presentan este tipo de membranas es que trabajan generalmente a presión atmosférica, lo que permite bajos costos de construcción y operación. La separación mediante este sistema es muy eficiente, trabajando a una temperatura entre 25 y 35 °C se llega a obtener un biogás con un 96% o más de metano, mientras que el CO<sub>2</sub> que se obtiene es puro y puede ser vendido con fines industriales (Wheeler, 2005).

**Figura 8.3 Diagrama de la difusión de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en absorción gas – líquido (Wheeler, 2005).**



## 8.2 Remoción de H<sub>2</sub>S.

El H<sub>2</sub>S siempre está presente en el biogás y su concentración depende del tipo de materia prima a partir de la cual es producido. Es de vital importancia la eliminación del H<sub>2</sub>S del biogás ya que este gas genera severos daños por corrosión en motores, tanques de almacenamiento, bujías y compresores (Mears, 2001). Incluso en muy bajas concentraciones, el H<sub>2</sub>S

puede causar serios problemas de corrosión en líneas de gas, motores y equipos de acondicionamiento de biogás. Además, este es un material altamente reactivo con los metales, y dicha reactividad es directamente proporcional con la temperatura, la presión y la concentración, además de que presenta un olor totalmente desagradable (NSCA, 2006). Por lo anterior, el H<sub>2</sub>S es generalmente el primer componente en ser eliminado de la corriente cruda de biogás.

La concentración de H<sub>2</sub>S en el biogás generado a partir de estiércol animal típicamente está en el intervalo de 1,000 a 2,400 ppm (Krich et al., 2005). La remoción de este compuesto se puede lograr por varios de los métodos descritos anteriormente para remoción de CO<sub>2</sub>. Esto se debe a que el H<sub>2</sub>S es también soluble en agua y en polietilenglicol. En el caso de la absorción gas – líquido se puede lograr que un biogás crudo que tenga una concentración de H<sub>2</sub>S de hasta un 2 % la reduzca hasta 250 ppm (McKinsey, 2003). Sin embargo, existen otras tecnologías que también son empleadas, las cuales se describen a continuación.

### **8.2.1 Inyección de aire / oxígeno.**

El contenido de H<sub>2</sub>S en la corriente cruda de biogás puede ser reducido de forma biológica por medio de la bacteria *thiobacilli*. Dicha bacteria induce la oxidación de los sulfuros contenidos en el biogás, convirtiéndolos mayoritariamente en azufre molecular y en sulfatos (Persson et al., 2006). En este proceso, la bacteria encargada de la oxidación crece de manera natural en la superficie del digestor y no requiere inoculación.



Dentro del proceso, la proporción de aire inyectado tiene que ser estequiométrica y por lo tanto, dicha proporción dependerá de la cantidad de  $H_2S$  en la corriente de biogás. El intervalo de aire generalmente empleado está entre el 2 - 6% del total de la corriente gaseosa (Krich et al., 2005). Sin embargo, la adición de la proporción adecuada de oxígeno tiene que ser debidamente supervisada debido a que, sin el debido control y cuidado de la inyección de aire, este proceso puede resultar en la formación de una mezcla potencialmente explosiva.

El método más simple para llevar a cabo este proceso consiste en la alimentación de oxígeno directamente al digestor. Así, los niveles de ácido sulfhídrico pueden ser reducidos en un 95 %, pudiendo llegar hasta las 50 ppm.

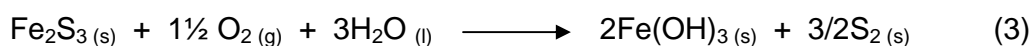
### **8.2.2 Inyección de cloruro de hierro.**

El cloruro de hierro ( $FeCl_3$ ) reacciona con el  $H_2S$  para producir sulfuro de hierro ( $Fe_2S_3$ ). Con el fin de reducir drásticamente los niveles de  $H_2S$  en la corriente de biogás, el cloruro de hierro puede ser agregado a la materia que se alimenta al digestor o ser inyectado directamente dentro del digestor y así reaccionar directamente con el  $H_2S$  producido (Krich et al., 2005). Esta reacción es óptima a temperaturas que oscilan entre los 25 y 50 °C y resulta efectiva en la reducción de altos niveles de  $H_2S$ , pero menos efectiva en el mantenimiento de niveles bajos y constantes de  $H_2S$ , que son requeridos cuando se pretende aplicar el biogás en transporte.

### 8.2.3 Adición de hidróxido u óxido de hierro.

El H<sub>2</sub>S reacciona de forma endotérmica con hidróxido de hierro II (Fe(OH)<sub>2</sub>) u óxido de hierro III (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) para formar sulfuro de hierro (Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub>). El proceso consiste en una reacción entre pellets cubiertos con Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Fe(OH)<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S. Los pellets impregnados con óxido de hierro generan una mucho mayor área superficial, que a su vez genera mayores rendimientos de reacción (Persson et al., 2006).

El intervalo óptimo de temperatura para esta reacción está entre 77°C y 122°C y el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Fe(OH)<sub>2</sub> puede ser regenerado con el simple flujo de aire sobre la cama de material. Típicamente dos camas son instaladas, una que está en operación, mientras que la otra está en su proceso de regeneración. En este sentido, se debe tener cuidado con el proceso de regeneración, controlando el flujo y temperatura del aire, ya que de lo contrario el material podría auto encenderse (Krich et al., 2005).



Este método es efectivo para lograr reducir altas concentraciones de H<sub>2</sub>S pero ineficiente en reducir el contenido de H<sub>2</sub>S a niveles muy bajos y estables como los que se requieren para el uso de biogás como combustible en automóviles. Por lo tanto, sería viable considerar este proceso sólo en el caso de la remoción parcial de H<sub>2</sub>S para evitar problemas en el proceso global de acondicionamiento de biogás (Wheeler, 2005). Este método necesita ser complementado con otro para lograr las concentraciones bajas establecidas por los estándares del uso de biogás como combustible en automóviles.

#### **8.2.4 Carbón activado.**

En sistemas PSA, el H<sub>2</sub>S es removido a partir del empleo de carbón activado que contiene yoduro de potasio (KI). El KI se emplea para ayudar a la adsorción del H<sub>2</sub>S de forma catalítica dentro del carbón activado. A su vez, la corriente de biogás tiene que ir acompañada de aire, que ayuda a que el H<sub>2</sub>S se convierta a azufre elemental y agua (Persson et al., 2006). Típicamente, cuatro tanques son usados en fila, permitiendo la transferencia de presión de un tanque a otro conforme se van saturando. De esta forma, cuando la presión se releva, entonces los contaminantes son de - sorbidos y relevados del tamiz de carbón activado (Krich et al., 2005).

El H<sub>2</sub>S es convertido catalíticamente a azufre elemental y agua, siendo capturado en el carbón activado. En este proceso, los intervalos de presiones y temperaturas óptimas de trabajo son 7 – 8 bar y 50 – 70 °C respectivamente. En este caso, la temperatura del gas es fácilmente lograda mediante el proceso de compresión (Wheeler, 2005).

La cama de carbón activado tiene una vida de operación de 4,000 a 8,000 horas o incluso mayores cuando trabajamos con niveles muy bajos de H<sub>2</sub>S. Dicha cama se regenera usualmente cuando la concentración de azufre está por encima de las 3,000 ppm. Así, con este proceso se pueden lograr concentraciones de H<sub>2</sub>S en el biogás de salida de aproximadamente 300 ppm (Krich et al., 2005).

#### **8.2.5 Absorción con hidróxido de sodio.**

La capacidad de absorción del agua se ve mejorada con una solución acuosa de NaOH, gracias a la reacción química que ocurre entre el H<sub>2</sub>S y el

NaOH. El  $H_2S$  reacciona con el NaOH para formar sulfuro de sodio  $Na_2S$  o sulfito ácido de sodio  $NaHSO_3$ . El proceso es conveniente debido a que la capacidad de absorción del agua se incrementa considerablemente, por lo que se requieren menores volúmenes de bombeo (Wheeler, 2005).

### **8.3. Remoción de hidrocarburos halogenados.**

Los hidrocarburos halogenados son altamente corrosivos y dañan los motores, las bujías, las cámaras de combustión y otros componentes de los autos. Por ello, los fabricantes de motores exigen concentraciones establecidas de éstos compuestos (Jönsson et al., 2006).

Estos compuestos, pueden ser removidos por intercambiadores de tubo a presión llenos con carbón activado. En éstos intercambiadores, las moléculas de  $CO_2$ ,  $N_2$  y  $O_2$  pasan a través del carbón sin ser retenidas, mientras que las moléculas grandes son absorbidas. Usualmente la instalación diseñada para este fin cuenta con dos tanques, uno trabaja en la adsorción y otro en la desorción de la materia retenida (Wheeler, 2005). En este sentido, las dimensiones de los intercambiadores son diseñados para purificar biogás en un periodo de más de 10 h.

La regeneración de material de adsorción es realizada por medio del calentamiento del carbón activado a una temperatura aproximada de  $200\text{ }^{\circ}C$  y los materiales retenidos son desorbidos y evaporados, siendo así, arrastrados por una corriente de gases inertes.

#### **8.4 Remoción de siloxanos.**

Los compuestos orgánicos de silicón son ocasionalmente encontrados en el biogás generado a partir de los vertederos y de los lodos de las aguas residuales. Estos compuestos causan severos daños a los motores de combustión interna de los autos. Además durante la combustión de estos compuestos se generan óxidos de silicio que causan que las bujías y otras válvulas se dañen se forma severa. Los motores otto son los que requieren mayores reparaciones, mientras que los motores duales sufren menos daños debido a que la temperatura del cuerpo completo del motor es mucho más elevada. Debido a dicho desgaste, los fabricantes de motores exigen límites máximos de siloxanos en el biogás (Wheeler, 2005).

La remoción de los siloxanos puede llevarse a cabo en un medio líquido. Por ejemplo, una mezcla de hidrocarburos con una alta capacidad para absorber compuestos de silicón. El absorbente podrá ser regenerado por aumento de temperatura.

#### **8.5 Remoción de oxígeno y nitrógeno.**

La presencia de  $O_2$  y  $N_2$  en la composición global de la corriente de biogás es signo de la infiltración de aire en el proceso. Esto ocurre principalmente en los rellenos sanitarios, en los que el biogás es extraído por una disminución de presión a través de tubos permeables. Bajas concentraciones de  $O_2$  no representan un problema. sin embargo, altas concentraciones de  $O_2$  conllevan a un riesgo de explosión. Esto debido a que un biogás con un porcentaje de metano del 60 % y el resto predominantemente

de dióxido de carbono es potencialmente explosivo con concentraciones entre 6 y 12 % en aire (Wheeler, 2005).

El  $O_2$  puede ser removido por membranas o por tamices moleculares de carbono. Sin embargo, el proceso suele ser bastante caro, por lo que es recomendable evitar la infiltración de aire en cualquier parte del proceso (Wheeler, 2005).

### **8.6 Remoción de vapor de agua.**

El biogás generalmente contiene cantidades significativas de agua. Esto debido a que usualmente es recolectado de la parte superior del biodigestor, que se encuentra justamente encima de una superficie líquida. La cantidad de vapor en la corriente de biogás depende de la temperatura y presión. El biogás típicamente contiene 10 % de vapor de agua a una temperatura de 43.4 °C, 5% en volumen a una temperatura de 32.2 °C y 1 % a una temperatura de 4.5 °C (Krich et al., 2005).

La remoción del vapor de agua a partir de la corriente de biogás es indispensable si es que se pretende evitar la corrosión, resultado de la condensación del biogás dentro del sistema. Además es de vital importancia la remoción del agua, debido a que si el  $H_2S$  no ha sido removido de forma previa, entonces éste puede reaccionar con el agua para formar ácido sulfúrico, el cual es mucho más corrosivo que el  $H_2S$ . Aún cuando el  $H_2S$  haya sido removido, el vapor de agua puede reaccionar con el  $CO_2$  para formar ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ), que de igual forma es corrosivo (Krich et al., 2005). En este sentido, con el fin de eliminar el vapor de agua de la corriente de biogás, se emplean generalmente refrigeradores con capacidades de 0.5 – 1 ton/h.

## **9. ANEXO 3**

### **COSTOS IMPLICADOS EN LA OPERACIÓN Y COMPRA DE UN AUTO A BIOGÁS**

Para el mes de febrero del 2010 en México, el costo de la gasolina Premium fue de \$9.70 / litro, el del diesel de \$8.32 / litro y el del GNC de \$5.57 / litro equivalente (GAZEL, 2010). Esto le da una ventaja considerable al GNC sobre los otros combustibles fósiles. Por lo tanto, si fuera aplicada la tecnología de biogás en transporte, y éste fuera vendido a un precio similar al del GNC, los conductores seguro obtendrían ahorros económicos considerables (NSCA, 2006).

Además de los costos de combustible, existen otros costos involucrados en la operación de un auto a gas, los principales son los siguientes:

- Los costos de capital adicionales implicados en los vehículos de GNC.
- Los costos de mantenimiento y otros costos de funcionamiento.

Cada uno de los elementos mencionados, es discutido a detalle en los siguientes apartados.

#### **9.1 Factores económicos involucrados en autos de biogás.**

La desventaja más grande que presentan los autos de gas respecto a los autos convencionales es el costo, siendo los primeros mucho más caros que los segundos. Así, a continuación se presentan las diferencias en costo entre los autos convencionales y los autos a gas. Dichos costos están basados en información de fabricantes de vehículos, operadores y ahorros de energía (NSCA, 2006).

- Los autos normales de pasajeros son de \$68,500 a \$90,000 más caros que sus equivalentes en gasolina.
- Las camionetas “Van” son aproximadamente \$110,000 más caras que sus equivalentes en gasolina.
- Los autos de servicio pesado HGV de encendido por chispa son de \$570,000 a \$800,00 más caros que el diesel estándar.
- Los autos de servicio pesado HGV de conversión de doble combustible de \$450,000 a \$570,000 más caros que el estándar diesel.

Los costos anteriores están basados en el mercado actual del Reino Unido, y debido a la carencia de infraestructura de biogás como combustible para transporte en ese país (situación similar a la de México), los costos son relativamente altos. A pesar de esto, se espera que dichos costos disminuyan cuando se de un incremento razonable en dicha infraestructura.

En lo que respecta a Suecia, un vehículo de servicio ligero es en promedio \$51,000 más caro que el mismo modelo de auto operando con gasolina, mientras que un autobús de gas es generalmente \$540,000 más caro. Estos costos extras, están generalmente relacionados con los tanques de almacenamiento de gas, y generalmente son compensados por un precio más bajo del BGC con respecto a la gasolina o el diesel. La idea es que el menor costo de compra del BGC compense después de 3-5 años de uso normal el costo extra del vehículo de gas (Atrax Energy, 2005).

Los costos más elevados de los autos de gas en comparación con los autos convencionales suelen desanimar a los compradores. Sin embargo, con el fin de alentar a la sociedad a depender cada vez menos del uso de combustibles fósiles, en Suecia existen diversos incentivos que promueven la



compra y el uso de eco-automóviles. Un eco-automóvil, es definido por las autoridades de aquel país como un auto que presenta bajas emisiones de gases de efecto invernadero, bajas emisiones de gases nocivos, y tiene bajos niveles de ruido. Entre este tipo de autos, se encuentran los autos de gas, y los individuos privados que compran un eco-automóvil en Suecia, reciben un subsidio de 1,100 € o 1,300 USD<sup>6</sup> (Atrax Energy, 2005).

## **9.2 Costos de mantenimiento.**

Como en muchos otros sentidos, se cuenta con muy poca información disponible sobre los costos de mantenimiento de los vehículos GNC comparado con sus equivalentes en diesel o gasolina. La experiencia en Suecia sugiere que los costos adicionales de mantenimiento de los autobuses GNC de encendido por chispa comparados con sus equivalentes en diesel son de 0.23 \$ / km. Esto se debe principalmente a la necesidad de más cortos intervalos de reemplazo de las bujías y del aceite de motor (Atrax Energy, 2005).

En lo que respecta a los sistemas de conversión de doble combustible donde el motor de encendido por compresión de diesel utiliza tanto gas comprimido y diesel, existen algunos datos que sugieren que los costos de mantenimiento no son superiores. Pero dado que hay dos sistemas de alimentación de combustible también parece razonable suponer que podría haber un ligero aumento (NSCA, 2006).

Así mismo, para vehículos ligeros que utilizan una versión bi - combustible de un motor de gasolina es probable que los costos de

---

<sup>6</sup> Precio escalado a diciembre del 2009.

mantenimiento sean ligeramente mayores que el equivalente de gasolina, una vez más debido a los dos sistemas de alimentación de combustible. Así, se asume un aumento de costes de mantenimiento 0.23 \$ / km para todos los vehículos de gas (NSCA, 2006).

En la Tabla 9.1 se muestra la estimación del capital adicional y los gastos de mantenimiento en términos de \$ / km y \$ / año para los vehículos típicos de GNC. Esta estimación supone una media de un período de cuatro años de vida comercial del vehículo. Los datos de kilometraje se han tomado del reporte (NCSA, 2006) y representan el promedio anual para autos de servicio ligero (LDV's) menores de 7,5 toneladas y autos de servicio pesado (HDV's) de más de 33 toneladas.

**Tabla 9.1 Costos adicionales de capital y de mantenimiento adicionales para autos de GNC.**

	km/año	Costos de capital, \$			Mantenimiento (\$)	Total	
		Total	Por año	Por kilómetro		\$ / km	\$ / año
Van	29,000	114,304	28,576	0.99	0.23	1.21	35,20
HGV SI	95,000	685,823	171,456	1.8	0.23	2.03	193,17
HGV Doble Combustible	95,000	457,215	114,304	1.2	0.23	1.43	136,02

### 9.3 Factores económicos del combustible.

Un motor de encendido por chispa empleado en vehículos de BGC / GNC, es menos eficiente que un motor diesel y por lo tanto existe una penalización en la eficiencia del combustible. Para los vehículos ligeros esto

puede ser alrededor del 20% comparado con un equivalente diesel, y para los vehículos pesados puede ser de un 40% o más (NSCA, 2006). La evaluación de los autobuses de GNC en Estocolmo como parte del proyecto tredsetter mostró una pena de consumo de combustible 60 % en zonas urbanas de operación. Sin embargo, con los últimos adelantos tecnológicos y alta eficiencia de carga, la diferencia entre el diesel y GNC parece ser entre 15 % y el 25 % (NSCA, 2006).

Por otro lado, cuando se emplea el GNC en un motor de encendido por chispa y en comparación con un equivalente de gasolina, el consumo de combustible será similar o ligeramente mejor. Del mismo modo, si un sistema de conversión de doble combustible es usado en un vehículo pesado, y si el diesel mantiene la eficiencia, entonces el consumo de combustible se supone que es similar al del motor diesel original. En el caso del vehículo doble combustible, se suele emplear aproximadamente el 30 % de diesel y 70 % GNC en su mezcla de combustibles (NSCA, 2006).

En este sentido, Tabla 9.2 muestra una comparación de costos y consumos de combustible para autos diesel, gasolina y a gas. Dicha tabla se elaboró tomando en cuenta los costos de combustibles en México para Febrero del 2010 así como los consumos de combustible determinados experimentalmente para autos pesados a GNC y diesel en el capítulo 4 y los consumos de gasolina, y GNC en autos ligeros y autos pesados con sistema Dual citados en un estudio realizado por la Sociedad Nacional para el Aire Limpio y Protección al Ambiente del Reino Unido (NSCA, 2006). Las estimaciones presentes en la Tabla 9.2 muestran que hay ahorros considerables en costos de combustible cuando operamos tanto vehículos de

servicio ligero y pesado en GNC. A este respecto, si el BGC puede ser vendido a un precio similar al del GNC, entonces el BGC puede ofrecer ahorros similares.

**Tabla 9.2 Comparación entre el costo y consumo de combustible de GNC, diesel y gasolina.**

Tipo de vehículo	km/año	Combustible	Consumo de combustible		Precio del combustible		Costo de comb.	
			l/100 km	kg/100 km	Diesel (l)	GNC (kg)	\$/km	\$/año
Vehículos ligeros	29,000	Gasolina	9.4		9.70		0.91	26,442
		Diesel	7.1		8.32		0.59	17,131
		GNC		6.2		5.57	0.35	10,015
Vehículos pesados	95,000	Diesel	31.0		8.32		2.58	244,787
		GNC SI		25.4		5.57	1.42	134,510
		GNC Dual	3.17	18.6	8.32	5.57	1.30	123,266

#### 9.4 Balance de costos.

Como ya se mencionó anteriormente, cuando se emplea el GNC (y potencialmente el BGC) como combustible, se presentan ahorros en lo que respecta a la operación. Éstos ahorros necesitan ser compensados contra los costos adicionales de capital de los vehículos y algunos costos adicionales de mantenimiento y de operación (NSCA, 2006).

La Tabla 9.3, se deriva de las Tablas 9.1 y 9.2 y muestra una comparación entre los costos de combustible combinados con los costos de capital y de operación para los vehículos de GNC en términos tanto de \$ / km y de \$ / año. Los datos mostrados en la tabla sugieren que los vehículos ligeros GNC (y potencialmente de biogás) son más caros que los de gasolina y diesel, y que los ahorros en costos de combustible no compensan los costos

adicionales de capital. Como se puede ver en la Tabla 9.3, el costo que presentan los autos de servicio pesado a diesel y doble - combustible son muy similares, teniendo que la operación de un diesel es ligeramente más barata que la de un doble - combustible. En contraste, en muchos países de la Unión Europea, incluso en E.U.A. es mucho más barata la operación de un auto de servicio pesado dual - combustible (70% GNC - 30% diesel) que la de un diesel, llegando a ser hasta £5,880 más barata (\$135,000) (NSCA, 2006). En este caso, lo ahorros en costos de combustible compensan totalmente los costos adicionales de capital de forma confortable dentro de los primeros cuatro años de vida comercial.

En lo que respecta a la opción de encendido por chispa, ésta parece ser menos efectiva, con el costo adicional de la re - ingeniería de los motores y los ligeros ahorros en costo de combustible comparados con los vehículos dual - combustible. Estos resultados explican en gran medida por qué el mercado para los vehículos de GNC / BGC que ha tenido mayor éxito a nivel mundial es el de los vehículos pesados (NSCA, 2006).

**Tabla 9.3 Costos adicionales de operación y costos totales de combustible.**

Tipo de vehículo	Km/año	Combustible	Costos	
			\$/km	\$/año
Vehículos ligeros	29,000	Gasolina	0.91	26,442
		Diesel	0.59	17,131
		GNC	1.56	45,220
Vehículos pesados	95,000	Diesel	2.58	244,787
		GNC SI	3.45	327,683
		GNC dual	2.73	259,287

En base a lo anterior, si el BGC es producido y vendido al mismo precio que el GNC, entonces la economía de empleo del BGC como combustible para transporte podría ser atractiva para vehículos pesados en México. Siempre y cuando existiera algún tipo de incentivo por el uso del BGC como los que se dan en Suecia. Dicha aseveración no debe de ser tomada como una respuesta definitiva debido a la carencia de información sobre la producción y aplicación del BGC en transporte.

## 10. REFERENCIAS

Alexandersson Sven (2003) *Biogas as Vehicle fuel an European Overview*. Trendsetter Report No 2003.

Alexandersson Sven (2009) *Better fuelling potential for biogas cars*. Environment and Health Administration. Trend Setter Setting Trends for Sustainable Urban Mobility

Answers.com, (2009) *Wobbe index* (en línea) (consulta: 16 de octubre del 2009) Disponible en web:

<http://www.answers.com/topic/wobbe-index>

Atrax Energy (2005) *Assessment of bioethanol and biogas initiatives for transport in Sweden* Background information for the EU-project. PREMIA EU Contract N° TREN / 04 / FP6EN / S07.31083 / 503081. May 2005.

Bergmaier (2010) (en línea) *Oxygen sensors* (consulta: 25 de abril del 2010). Disponible en web: <http://www.gas-bench-repair.eu/>

Biogasmax (2009) *Biogas fuel market breakthrough* (en línea) (consulta: 18 de diciembre 2009) Disponible en web :

<http://www.biogasmax.eu/biogas-goteborg/biogas-biofuel-vision.html>

Björn,Rehnlund ( 2008) *Outlook on standardization of alternative vehicle fuels*. Global, Regional and National level. Atrax Energi AB, Sweden. 09 de Noviembre del 2008

Börjesson P (2007) *Biogas from waste materials as transportation fuel – benefits from an environmental point of view*. Dept. of Technology and Society, Lund University.Environmental and Energy Systems Studies.

Braun R. (2005) (en línea) *Country Update Austria – 2005*.Institute for Environmental Biotechnology Department for Agrobiotechnology – IFA Tullh BOKU – University of Natural Resources an Applied Life Sciences. Vienna.

Bruijstems A.J. Beuman W.H.P. Molen M.V.D. Rijke J.d., Cloudt R.P.M., Kadijk G.. Camp O.o.d., Bleuanus S (2008) *Biogas composition and engine performance, including data base and biogas property Model*. Biogas Max. Enero del 2008.

CVTF( *Cleaner Vehicles Task Force*) (2000) *The Report of the Alternative Fuels Group of the Cleaner Vehicles Task Force. An assessment of the Emissions Performance of Alternative and Conventional Fuels*, DTI. Enero del 2000.

Díaz Bernardino (2001) *Estado del arte sobre el tratamiento biológico para los residuales de Punta Periquillo II*. Digestión Anaerobia. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXIII, No. 1, 2002.

DieselNet (2010) *Cars and Light Trucks* (en línea) (consulta: 23 de febrero del 2010) Disponible en web:

<http://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>

DMT (Dirkse Milieutechniek) (2009) *Biogas Upgrading* Technische Universiteit Eindhoven University of Technology (en línea) (consulta: 26 de octubre del 2009) Disponible en web:

<http://students.chem.tue.nl/ifp24/>

Eliasson Gabriella (2005) *Biogas as transport fuel*. Swedish Biogas Association. Estocolmo Suecia.

Emerson (2007) *The Wobbe Index and Natural Gas Interchangeability* (en línea) Application Data Document. July 30, 2007 (consulta: 12 de enero del 2010). Disponible en web:

[http://www.documentation.emersonprocess.com/groups/public/documents/application\\_notes-tech\\_briefs/d301334x012.pdf?&xBusinessUnit=Remote%20Automation%20Solutions](http://www.documentation.emersonprocess.com/groups/public/documents/application_notes-tech_briefs/d301334x012.pdf?&xBusinessUnit=Remote%20Automation%20Solutions)

Fernández García Belén (2007) *Digestión metanogénica de purines porcinos y "stripping" de N.* (en línea) GIRO Centro Tecnológico (consulta: 24 de junio 2009) España. Disponible en web:

<http://www.3tres3.com/medioambiente/ficha.php?id=2006&id2=0>

Fischer Torsten, Krieg Andreas (2002). *Farm-Scale Biogas Plants*. Krieg y Fischer Ingenierure GmbH. Hanna – Vogt – Strasee 1. D 37085 Goettingen, Alemania

Franz Hofmann Alternative Fuels ( 2004) *This paper outlines the principal of lean burn combustion and how it can improve engine efficiency* (en línea) (consulta: 03 de septiembre del 2009) Disponible en web:

<http://franzh.home.texas.net/lean.html>

Gazel (2010) (en línea) (consulta: 22 de abril del 2010) Disponible en web: [http://www.gazel.com.co/wps/wcm/connect/web\\_content/gazel](http://www.gazel.com.co/wps/wcm/connect/web_content/gazel)

Green Peace (2009) *Efecto Invernadero* (en línea) (consulta: 16 de agosto 2009) España Disponible en web:

<http://www.greenpeace.org/espana/campaigns/energ-a/causas/efecto-invernadero>

IEA (Agencia Internacional de Energía) (2007) *Biogas Upgrading and Utilisation*, IEA Bioenergy. Task 24: Energy for Biological Conversion of Organic Waste

IEA (Agencia Internacional de Energía) (2008) *Key World Energy Statistics 75739* Paris Cedex 15.

INE (Instituto Nacional de Ecología) (2003) *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990 – 2002*. Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas. México.



IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2007) *Cambio Climático 2007 Informe de Síntesis*. Ginebra, Suiza.

Johan Rietz, (2005) *Summary and analysis of the potential for production of renewable methane (biogas and SNG) in Sweden*, Swedish Gas Council, March 2005.

Jönsson O., Persson M. (2003) *Biogas as transportation fuel*. Swedish Gas Centre, Suecia. *Fachtagung* (1) 99 - 111

Krich Ken, Augenstein Don, Batmale JP, Benemann John, Rutledge Brad, Salour Dara (2005) **Biomethane from Dairy Waste A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California**, July 2005.

Linné Marita, Jhönsson Owe (2004) *Summary and analysis of the potential for production of renewable methane (biogas and SNG) in Sweden*. BioMil AB. Suecia.

Lumasense (2010) (en línea) *Andros 6500* (consulta: 25 de abril del 2010) Disponible en web: <http://www.lumasenseinc.com/EN/products/gas-monitoring-instruments/gas-monitoring-oem/andros-6500-6520.html>

Masera Cerutti Omar (2005) *La bioenergía en México, un catalizador del desarrollo sustentable*. Red Mexicana de Bioenergía. Editorial Mundi-Prensa Libros. México

McKinsey Zicari Steven (2003) *Removal of hydrogen sulfide from biogas using cow-manure compost*. Tesis de maestría. Facultad de la Escuela de Graduados de la Universidad de Cornell. E.U.A.

Mears, D.T. (2001) *Biogas applications for large dairy operations: alternatives to conventional engine-generators*. Prepared under contract to Cornell Cooperative Extension Association of Wyoming County, Warsaw, NY. Final Edition.

MECA (Asociación de Productores de Convertidores Catalíticos) (2009) (en línea) *Clean Air Facts. The Catalytic Converter*. Technology for Clean Air. (consulta: 27 de noviembre del 2009) Disponible en web: <http://www.meca.org/galleries/default-file/catconfact%200106.pdf>

Mecanicavirtual (2009) *Sistema EGR* (en línea) (consulta: 28 de Noviembre del 2009) Disponible en web: [http://www.mecanicavirtual.org/sistema\\_egr.htm](http://www.mecanicavirtual.org/sistema_egr.htm)

**Montoya Javier (2008) Composta (en línea)** Secretaría Administrativa UNAM, Dirección General de Obras y Conservación (consulta: 15 de agosto del 2009) Disponible en web: [http://www.obras.unam.mx/cecolog/composta\\_intr\\_f.html](http://www.obras.unam.mx/cecolog/composta_intr_f.html)

Murphy J.D., McCarthy K.. (2005) The optimal production of biogas for use as a transport fuel in Ireland. *Renewable Energy* 30 (14) 2111-212.7

Murphy JD (2006) *CH<sub>4</sub>-enriched biogas utilised as a transport fuel: the case for the utilisation of biogas as a transport fuel*, Academic review. The Engineers Journal, 59 (9)571 – 576.

NGVA (Asociación Mundial de Autos de Gas) (2009) (en línea) *Worldwide NGV Statistics. NGVs & refuelling stations Worldwide* (Consulta: 27 de febrero del 2010). Disponible en web:

<http://www.ngvaeurope.eu/worldwide-ngv-statistics>

**Nozic Mirsada, (2006)** *Removal of carbón dioxide from biogas*. Department of Chemical Engineering, Lund University. P.O. Box 124, SE-221 00 Lund, Sweden.

NSCA (Sociedad Nacional para el Aire Limpio y Protección Ambiental) (2006) *Biogas as a road transport fuel*. An assessment of the potential role of biogas as a renewable transport fuel. Reino Unido.

Persson Margareta (2007) *Biogas upgrading and utilization as vehicle fuel*. Swedish Gas Center European Biogas Workshop The Future of Biogas in Europe III 2007-06-14

Persson Margareta, Jönsson Owe, Wellinger Arthur (2006 ) *Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection*. IEA Bioenergy Task 37 - Energy from Biogas and Landfill Gas.

Peterson Anneli (2007) *Biogas as Transport Fuel-Upgrading Technique and Application..* Swedish Gas Centre. Scheelegatan 3, SE – 212 28 Malmö, Suecia.

Rivera Jorge, Cuevas Alejandro, Castillo Ricardo (2008) *Instalaciones portuarias, Layout de un Centro de Descarga de Gas Natural*. Universidad de Chile. Facultad de Ciencia Fisicas y Matematicas. Departamento de Ingeniería Mecánica.

SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2009) *Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes*. Combustibles y vehículos en México, combustibles limpios.

SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales)(2010) *Emisiones atmosféricas del transporte*. Gestión Ambiental. Calidad del Aire. (en línea) (consulta: 12 de marzo del 2010) Disponible en web: <http://www.semarnat.gob.mx/gestionambiental/Pages/inicio.aspx>

SENER (Secretaría de Energía) (2007) *Balance Nacional de Energía 2007*. Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Investigación y Estudios Energéticos. México.

UNEP (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) (2007) *Abriendo la puerta a los Vehículos limpios en países en desarrollo y en transición: El papel de los combustibles de bajo azufre*. Informe del Grupo de Trabajo sobre Azufre de la Alianza para Combustibles y Vehículos Limpios (PCFV).

Wheeler PA, Rome de L (2002) *Waste Pre-Treatment*. A Review. Environment Agency. R&D Technical Report PI-344/TR.

Wheeler Pat (2005) *Biogas Upgrading and Utilisation*. IEA Bioenergy. Task 24: Energy for Biological Conversion of OrganicWaste.