

106



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

EL GAS NATURAL COMO COMBUSTIBLE VEHICULAR, UNA OPCIÓN PARA LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

298-166

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :

INGENIERO - QUÍMICO

P R E S E N T A :

LUIS GERARDO LÓPEZ ATAMOROS

A S E S O R :

EDUARDO MARAMBIO DENNETT



MÉXICO, D.F.



2001.

EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA



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 está 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 Prof. José Antonio Ortiz Ramírez

Vocal Prof. Jaime Medina Oropeza

Secretario Prof. Eduardo Marambio Dennett

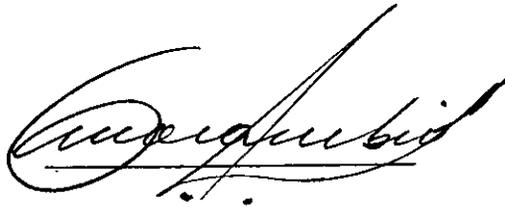
1er. Suplente Prof. Rodolfo Torres Barrera

2º Suplente Profr. Alfonso Durán Moreno

Desarrollada en la Coordinación de Seguridad, Prevención de Riesgos y Protección Civil de la Facultad de Química, laboratorio 4-D, edificio A, Facultad de Química, Ciudad Universitaria, Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México.

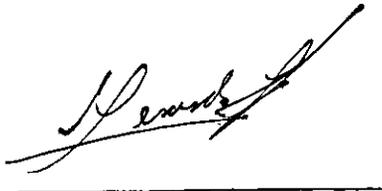
Asesor

Eduardo Marambio Dennett



Sustentante

Luis Gerardo López Atamoros





Indice

INTRODUCCIÓN:.....	2
CONTENIDO.....	5
☺ 1. IMPORTANCIA DE LAS ALTERNATIVAS EN COMBUSTIBLES PARA LA ZMCM.....	10
1.1. PROBLEMÁTICA GENERADA POR LA CONTAMINACIÓN.....	10
1.1.1. <i>Algunos de los principales problemas que produce la contaminación.</i> 11	
1.1.2. <i>Algunos de los costos producidos por la contaminación.</i>	18
1.2. DISPONIBILIDAD, EFICIENCIA Y COSTOS DE LOS COMBUSTIBLES.....	30
1.2.1. <i>Estimado sobre disponibilidad</i>	31
1.2.2. <i>El gas natural</i>	32
1.2.3. <i>Estimados para fuentes limpias</i>	33
1.2.4. <i>El Ciclo Completo de la Energía</i>	36
☺ 2. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL GAS NATURAL.....	41
2.1. ¿QUÉ ES EL GN?.....	41
<i>Definición, Composición, propiedades</i>	41
2.2. EN QUÉ SE UTILIZA Y QUÉ TAN IMPORTANTE ES.....	45
<i>Usos tradicionales, Magnitud del consumo</i>	45
2.3. CÓMO SE ORIGINA, PRODUCE, TRANSPORTA Y ALMACENA.....	49
<i>Historia de la formación del GN y su localización</i>	49
<i>Origen del GN</i>	50
2.4. VENTAJAS DEL GAS NATURAL.....	59
2.4.1. <i>Ventajas Ambientales</i>	59
2.4.2. <i>Ventajas en seguridad</i>	65
2.4.3. <i>Ventajas Económicas</i>	66
☺ 3. EL GAS NATURAL COMO COMBUSTIBLE VEHICULAR.....	67
3.1. RELEVANCIA DEL GN COMO COMBUSTIBLE VEHICULAR.....	67



3.2. COMPARACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL GN CON OTROS COMBUSTIBLES VEHICULARES.	69
3.2.1. Combustibles vehiculares.....	69
3.2.2. Propiedades físicas del GN como combustible vehicular.....	70
3.2.3. Comparativo entre combustibles vehiculares.	74
3.2.4. Aproximación económica.....	87
3.3. VEHÍCULOS A GN.....	91
3.3.1. Definición de Vehículos a Gas Natural (NGVs).....	91
3.3.2. Clasificación de los NGVs.....	92
3.3.3. Desarrollo de los NGVs.....	94
3.3.4. Ciclo de empleo.....	104
3.4. EXPERIENCIAS MUNDIALES EN EL USO DE VEHÍCULOS A GN.....	111
3.4.1. Inicios.....	111
3.4.2. Empleo actual.....	112
3.4.3. Mecanismos de apoyo.....	113
☺ 4. EXPERIENCIAS EN MÉXICO.....	115
4.1. EXPERIENCIAS EN LA ZMCM EN LA CONVERSIÓN DE VEHÍCULOS A GN.....	115
4.1.1. Proyectos desarrollados con vehículos a GN en la ZMCM.....	116
4.1.2. Descripción del proyecto de una Empresa de Autotransportes Urbanos de Pasajeros de la Ciudad de México "Proyecto piloto: aplicación de gas natural licuado (GNL) en vehículos de uso intensivo".....	117
4.1.3. Reporte de avances de E.P.G.L.C. de México (1993).....	132
4.1.4. Desenlace del proyecto para el empleo de GNL.....	142
4.2. ACCIONES RECIENTES.....	143
☺ 5. RECAPITULACIÓN Y CONCLUSIONES:.....	146
CONCLUSIONES:.....	150
REFERENCIAS.....	151
BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA.....	153



Iniciales Empleadas

- µg: Microgramo
- AMGN: Asociación Mexicana del Gas Natural
- Atm: Atmósfera, Unidad de presión equivale a 14.696 psi
- Bar: Bares, equivalente a 0.9869 atmósferas: 1 Atm = 1.01325 Bar
- Bé: Unidad de densidad Baumé
- Billones: Millones de Millones, equivalente a los trillones de EUA
- BTU: British Thermal Unit, equivalente a 1,055.056 Joules
- CEI: Comunidad de Estados Independientes
- DARR: Días de Actividad Restringida a Causa de Problemas Respiratorios
- DDF: Departamento del Distrito Federal
- DF: Distrito Federal
- dL: Decilitro
- DME: Dimetil Éter
- E.A.U.P.C.M.: Empresa de autotransportes urbanos de pasajeros de la Ciudad de México.
- E.P.G.L.C.: Una empresa procesadora de gases "L.C."
- EPA: (Environmental Protection Agency) Agencia de Protección Ambiental de los EUA
- EUA: Estados Unidos de Norteamérica
- ft: Pies, equivalente a 0.3048 metros
- ft³: Pies Cúbicos, equivalente a 28.317 litros
- g: Gramos
- gal: Galón americano, equivalente a 3.7854 litros
- GDF: Gobierno del Distrito Federal
- GLP: Gas licuado de petróleo
- GN: Gas natural



- GNC: Gas natural comprimido
- GNCL: Gas natural comprimido a partir del GNL
- GNL: Gas natural licuado
- gpm: galones por minuto
- h: hora
- HC: Hidrocarburos.
- HHV: Mayor Valor de Calentamiento, en BTU, Capacidad calorífica Mayor
- ICI: Imperial Chemical Industries
- IMECA: Índice Metropolitano de Calidad del Aire
- INE: Instituto Nacional de Ecología
- IPCC: Panel Intergubernamental del Cambio Climático, en los EUA
- kcal: Kilo caloria, equivalente a 4,186.8 Joules
- kg: Kilogramos
- km: Kilómetro
- L: Litro
- lb: Libra, equivalente a 453.59 gramos, 1 kg = 2.2046 lb
- Milla: Unidad de medida de longitud, equivalente a 1.6 km.
- Min: Minuto
- MM: Miles de Millones, equivalente a los billones de EUA
- MMBTU: Miles de Millones de BTU
- NASA: Agencia Aérea y Espacial de los EUA
- NGV: (natural gas vehicle) Vehículo a Gas Natural
- NGVs: Plural de NGV
- NOM: Normas Oficiales Mexicanas
- NOx: Óxidos de Nitrógeno en general
- °C: Grados Celsius de temperatura
- °F: Grados Fahrenheit de temperatura
- OMS: Organización Mundial de la Salud
- PAN: Nitratos de Peroxiacetilo



- PEMEX: Petróleos Mexicanos
- pH: Potencial Hidrógeno, grado de acidez
- PM: Partículas de Materia
- PM-10: Partículas en su Fracción Respirable, menor a 10 micras.
- ppm: partes por millón: mg / kg ó mL / Metro cúbico (1000 L)
- psi: (pound per square inch) Libra por pulgada cuadrada, equivalente a 0.068046 atmósferas
- psig: (psi gauge) Psi manométricas
- PST: Partículas Suspendidas Totales
- S.G.: Gravedad Específica
- SEDESOL: Secretaría de Desarrollo Social
- SEMARNAP: Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, ahora SEMARNAT.
- SOx: Óxidos de Azufre en general
- SSA: Secretaría de Salubridad y Asistencia
- STPS: Secretaría del Trabajo y Previsión Social
- ULEV: Normas en los EUA de Ultra Bajas Emisiones Vehiculares de contaminantes
- USD: Dólares de los Estados Unidos de Norteamérica
- WBR: (World Bank Report) Reporte del Banco Mundial
- ZMCM: Zona Metropolitana de la Ciudad de México
- ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México



El gas natural –GN– como combustible vehicular, una opción para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

El gas natural –GN– es un combustible que se puede emplear como sustituto de la gasolina y el diesel en el sistema de transporte en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México –ZMCM–; siendo la principal ventaja de esta sustitución la reducción en la emisión de contaminantes.

Los objetivos de este trabajo son:

Tratar los puntos descritos en el contenido con el fin de crear un marco de referencia general que cimiente las bases para una conversión masiva de automotores al combustible alternativo gas natural –GN– en la ZMCM y otras ciudades principales de nuestro país donde la contaminación atmosférica debida a vehículos represente un problema.

Tratar las ventajas del GN sobre la gasolina y el diesel como combustible para vehículos debido a sus características proambientales en cuanto a emisión de contaminantes.

Mencionar las principales ventajas desde la perspectiva de la seguridad en el empleo del gas natural.



Realizar una comparación entre los combustibles actualmente utilizados y los que se espera que podrían sustituir a estos en un futuro cercano, mostrando como el más favorable entre las principales opciones al gas natural licuado –GNL–.

Describir uno de los programas con mayor proyección que se han realizado en México para la conversión de un segmento importante de los transportes urbanos para pasajeros, su desarrollo y su conclusión.

Plantear una aproximación económica sobre el costo de la conversión a gas natural del transporte de uso intensivo en la ZMCM tomando como referencia el ahorro que representa la menor emisión de contaminantes.

Introducción:

El presente trabajo es motivado por la preocupación cada vez más acuciente acerca del medio ambiente, la ecología y el uso racional de los energéticos que se ha convertido en tema común para inicios del segundo milenio.

Estos temas se han abordado desde muy diversos enfoques dando como resultado una amplia gama de propuestas que incluyen desde acciones específicas como la aditivación de los combustibles y programas para el uso racional de los vehículos (como el Hoy No Circula, que ha tenido aciertos y desventajas); hasta planes de reubicación para las ciudades y para los focos de contaminación, así como la implementación de tecnologías de vanguardia (aún no del todo desarrolladas) como el empleo de celdas electroquímicas de combustible –de hidrógeno por ejemplo– que al producir electricidad generen sustancias no dañinas para el medio ambiente –solamente agua pura, en el caso anterior–.



Realizar una comparación entre los combustibles actualmente utilizados y los que se espera que podrían sustituir a estos en un futuro cercano, mostrando como el más favorable entre las principales opciones al gas natural licuado –GNL–.

Describir uno de los programas con mayor proyección que se han realizado en México para la conversión de un segmento importante de los transportes urbanos para pasajeros, su desarrollo y su conclusión.

Plantear una aproximación económica sobre el costo de la conversión a gas natural del transporte de uso intensivo en la ZMCM tomando como referencia el ahorro que representa la menor emisión de contaminantes.

Introducción:

El presente trabajo es motivado por la preocupación cada vez más acuciante acerca del medio ambiente, la ecología y el uso racional de los energéticos que se ha convertido en tema común para inicios del segundo milenio.

Estos temas se han abordado desde muy diversos enfoques dando como resultado una amplia gama de propuestas que incluyen desde acciones específicas como la aditivación de los combustibles y programas para el uso racional de los vehículos (como el Hoy No Circula, que ha tenido aciertos y desventajas); hasta planes de reubicación para las ciudades y para los focos de contaminación, así como la implementación de tecnologías de vanguardia (aún no del todo desarrolladas) como el empleo de celdas electroquímicas de combustible –de hidrógeno por ejemplo– que al producir electricidad generen sustancias no dañinas para el medio ambiente –solamente agua pura, en el caso anterior–.



Se pretende aquí llamar la atención sobre una solución factible a corto plazo, que aunque ya ha sido ampliamente probada en diversos países y es incluso parte de la nueva legislación con énfasis en el control de la contaminación de ciertos gobiernos a la vanguardia en tecnologías proambientales, no ha recibido todo el apoyo y la difusión que permitirían su implementación en nuestro país de forma expedita; especialmente en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México – ZMCM–.

Esta solución, el empleo de gas natural, –especialmente el licuado– como una alternativa a corto plazo para impulsar vehículos con motores de combustión interna en la ZMCM es factible considerando algunos de los muy diversos factores que influyen sobre la conveniencia de un proyecto de esta magnitud. Cabe mencionar que ya se han realizado algunas pruebas en México, siendo sus resultados satisfactorios, y quedando la incógnita ya común de: ¿Por qué no se aplica entonces? Algunos de los factores antes mencionados son:

- La Influencia de la contaminación sobre la salud pública, su costo directo, indirecto y la política de acción del gobierno.
- Conveniencia sobre la independencia en materia de gasolina de importación.
- Posibilidades del uso de los derivados del petróleo en productos “de transformación” y no meramente como “combustibles”.
- Conveniencia sobre el empleo del gas natural producido en México –que requiere menor proceso para usarse que la gasolina–.
- Ventajas económicas por el empleo de un combustible con propiedades favorables al mantenimiento de los vehículos, que redundan, consecuentemente, en beneficios económicos inmediatos para, al menos, ciertos sectores de la población, mas los beneficios indirectos para todos. –En precios, salud, calidad de vida y otros–.



Es importante mencionar que los principales beneficios quedarían plasmados en el ámbito de la salud con sus consiguientes beneficios económicos, resultado del empleo de un combustible que desecha en su mayoría productos no dañinos para los seres vivos ni los bienes materiales.

El proceso necesario para la implementación de este sistema se mostrará más adelante tomando como base los adelantos hechos en países pioneros en el uso de estos sistemas.

Evaluación:

El objetivo de este trabajo quedará cubierto si logra atraer la atención sobre la importancia y las ventajas de una sustitución a GN por parte de los dueños de flotillas y vehículos de uso intensivo, sin desprestigiar a los particulares, y sin restar atención a la creación de los mecanismos adecuados para lograr este cambio:

Promoción al gas natural, facilidades a los fabricantes de vehículos con este combustible alternativo para introducir los modelos correspondientes, crear la infraestructura de abasto y distribución, crear el sistema de precios e incentivos para todos aquellos que realicen la conversión, brindar la educación y desmitificación necesaria para el empleo familiar de estos combustibles, etc.

La directriz general de este trabajo considera los siguientes puntos:



Contenido

© 1. Importancia de las alternativas en combustibles para la ZMCM

Donde se consideran dos puntos principales:

Algunas consecuencias producidas por la contaminación; se mencionan algunos de los efectos de la contaminación atmosférica y, una evaluación preliminar en términos económicos sobre estos mismos efectos.

Un enfoque de corto plazo sobre la conveniencia de diferentes combustibles; donde se hace un bosquejo sobre los combustibles alternativos – incluyendo el tiempo restante para su introducción a gran escala–, las reservas de combustibles tradicionales, las existencias de gas natural y el costo de cada tipo de fuente energética para, finalmente, formar un cuadro donde se procura reflejar el costo real de cada tipo de energía.

1.1. Problemática generada por la contaminación.

1.1.1. Algunos de los principales problemas que produce la contaminación:

- A la salud
- Al ambiente

1.1.2. Algunos de los costos producidos por la contaminación.

- Costos evaluados según la perspectiva mundial
- Evaluación para la ZMCM

1.2. Disponibilidad, eficiencia y costos de los combustibles

1.2.1. Estimado sobre la disponibilidad

1.2.2. El gas natural

1.2.3. Estimados para fuentes limpias



1.2.4. El Ciclo Completo de Energía

- Comparación de la eficiencia
- Comparación de emisiones

☺ 2. Características y propiedades del gas natural

Donde se describe el GN, qué es y qué tipos hay, cuál es su composición, cuáles son sus propiedades físicas, cómo se usa, cómo se originó, cómo se puede producir, cómo se transporta y almacena, cuáles son sus ventajas económicas, ambientales y en seguridad en diferentes aplicaciones.

2.1. ¿Qué es?

- Definición
- Composición
- Propiedades físicas

2.2. En qué se utiliza y qué tan importante es

- Usos tradicionales

2.3. Cómo se origina, produce, transporta y almacena

- Historia de la formación del GN y su localización
- Origen del GN
- Transporte y almacenamiento del GN

2.4. Ventajas del gas natural

2.4.1. Ventajas ambientales

2.4.2. Ventajas en seguridad

2.4.3. Ventajas económicas

☺ 3. El gas natural como combustible vehicular.

Donde se describen el funcionamiento, las variedades y las diferentes opciones en vehículos a GN y sus características: potencia, forma de abasto, instalaciones y equipo necesario, emisiones, preparación de las variedades de GN



y algunos ejemplos de países donde se emplea cotidianamente describiendo los puntos principales de los proyectos y hacia donde se enfocan principalmente los esfuerzos para la conversión: flotillas, transporte público, carga pesada y uso intensivo.

- 3.1. Relevancia del GN como combustible vehicular
- 3.2. Comparación de propiedades físicas del GN con otros combustibles vehiculares
 - 3.2.1. Combustibles vehiculares
 - 3.2.2. Propiedades físicas del GN como combustible vehicular
 - 3.2.3. Comparativo entre combustibles vehiculares
 - 3.2.4. Aproximación económica
- 3.3. Vehículos a GN
 - 3.3.1. Definición de Vehículos a Gas Natural, (NGVs).
 - 3.3.2. Clasificación de los NGVs
 - 3.3.3. Desarrollo de los NGVs
 - 3.3.4. Ciclo de empleo
- 3.4. Experiencias mundiales en el uso de vehículos a GN
 - 3.4.1. Inicios
 - 3.4.2. Empleo actual
 - 3.4.3. Mecanismos de apoyo

☺ 4. Experiencias en México

Donde se da una descripción de algunos de los esfuerzos realizados en nuestro país para obtener un sistema de transporte a GN poco contaminante, los puntos principales en su ejecución, su estado actual y la descripción del proyecto de GNL por una Empresa de Autotransportes Urbanos de Pasajeros de la Ciudad de México –E.A.U.P.C.M.–.



- 4.1. Experiencias en la ZMCM en la conversión de vehículos a GN.
 - 4.1.1. Proyectos desarrollados con vehículos a GN en la ZMCM
 - 4.1.2. Descripción del proyecto en una Empresa de Autotransportes Urbanos de pasajeros de la Ciudad de México, (E.A.U.P.C.M.)
 - Antecedentes, elección de participantes, beneficios esperados, funcionamiento, pruebas a realizar, datos técnicos, protocolo de pruebas para el abasto.
 - Desarrollo cronológico del proyecto
 - Informe del costo estimado para la conversión
 - 4.1.3. Reporte de avances de la Empresa Procesadora de Gases "L.C.", (E.P.G.L.C.)
 - Introducción, planta piloto, vehículos y mercado, competidores, inversión y organización, situación legal, próximos pasos, futuro cercano
 - 4.1.4. Desenlace del proyecto para el empleo de GNL
 - 4.2. Acciones recientes
 - Normas relativas al GN
 - Situación actual en la ZMCM
- ☺ 5. Recapitulación y Conclusiones
- Recapitulación general
 - Conclusiones

Así, a pesar de que la información se encuentra en la actualidad al alcance de una proporción mucho mayor de la población que en cualquier otra época registrada de la humanidad, nuestra conducta como especie en conjunto es de flagrante ignorancia en cuestiones de beneficio común a todos los niveles. Obviando que el origen de gran cantidad de los males que nos aquejan se encuentra en la falta, deficiencia o mal enfoque de la educación, y, esperando que los mecanismos de control por parte de la población y la conciencia de cada persona sigan mejorando



hasta la comprensión de que el beneficio del conjunto es mejor para el beneficio propio que su explotación indiscriminada (de los recursos naturales o de las personas) habrá que seguir concretándose a la resolución de los problemas y necesidades específicos que afectan a los seres humanos según se vayan presentando.

De acuerdo con este planteamiento se tratará de esbozar aquí una alternativa para la solución del problema debido a la contaminación atmosférica en nuestra ciudad, la ZMCM.

La contaminación atmosférica es fuente de una amplia variedad de problemas que afectan directa o indirectamente al ser humano. Muchos de estos problemas son usualmente ignorados, minimizados o evadidos a pesar de que las consecuencias no son sólo a corto y mediano plazo. A pesar del auge en cuanto a educación y difusión "ecológica", todo el funcionamiento en nuestro país y en gran parte del mundo, está enfocado hacia el "beneficio rápido" que en persecución de un bienestar inmediato y parcial desprecia cualquier tipo de valor perenne a largo plazo, aún a costa del daño a la especie humana en su conjunto, a todas las demás especies animales, a la vegetación y a todo el sistema que permite la vida en nuestro planeta.



☺ 1. Importancia de las alternativas en combustibles para la ZMCM

El contar con combustibles alternativos a la gasolina y el diesel para los vehículos automotores es una solución realizable a corto y mediano plazo que puede ayudar a evitar la amplia gama de problemas que genera la contaminación atmosférica en la ZMCM.

1.1. Problemática generada por la contaminación.

La contaminación, no únicamente la atmosférica, produce una amplia gama de resultados indeseables para los seres humanos y, en general, para todos los seres vivos de nuestro planeta. La veracidad de esta afirmación es evidente al contemplar con perspectiva amplia que si desestabilizamos el llamado "equilibrio ecológico" rompiendo eslabones de las "cadenas ecológicas" en diversos puntos y en forma indiscriminada cuando no comprendemos la magnitud de las consecuencias, nos arriesgamos a afectar permanentemente a muchos de los organismos existentes y, por consecuencia lógica, más tarde o más temprano, a



nosotros mismos. Cabe mencionar que se estima que solamente por la deforestación en selvas tropicales desaparecen 96 especies animales cada día^a.

Aunque existen diferentes variedades de contaminación: del agua, del suelo, la auditiva, etc., la contaminación del aire es una de las que afecta más homogéneamente a las personas en las ciudades, trayendo consigo una gran variedad de problemas. Estos problemas, a los bienes materiales, a la naturaleza en general, a la salud e incluso a la psique humana, son no sólo solucionables sino también eludibles.

1.1.1. Algunos de los principales problemas que produce la contaminación.

A la salud:

Principales tipos de contaminación y sus efectos:

Los seis principales tipos de contaminantes del aire en áreas metropolitanas son: monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HCs, compuestos orgánicos volátiles), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), plomo (Pb) y partículas de materia (PM). Las emisiones de los vehículos movidos con gasolina y diesel contribuyen significativamente con cinco de las seis fuentes de contaminación, causando en promedio el 90% de la contaminación de CO, el 30% de plomo, 50% de HC, 50% de NOx, que se combinan para formar el 50% de los oxidantes fotoquímicos, incluyendo el daño ozono a nivel de suelo. Los vehículos a diesel también son un contribuyente sustancial de la contaminación por partículas.^[1]

^a {¿Cuántas especies animales podría mencionar un ciudadano común?}

Tabla 1

Principales contaminantes atmosféricos

Monóxido de carbono	CO, resulta de la oxidación incompleta a CO ₂
Hidrocarburos	HC, Incluye alcanos y aromáticos.
Óxidos de Nitrógeno	NO _x , incluye NO ₂ , N ₂ O ₃ , NO, N ₂ O y N ₂ O ₅
Óxidos de Azufre	SO _x , incluye SO ₂ , SO ₃
Plomo	Pb, como metal, óxido o etilo de plomo mixto.
Partículas de Materia	PM, ceniza, polvo, restos orgánicos.

En términos generales se considera que la contaminación debida a automotores genera el 50% de las emisiones contaminantes en el mundo, esta cifra aumenta hasta el 70% en promedio o alcanzando incluso el 85% en las ciudades.

Monóxido de carbono (CO):

Es un subproducto del quemado incompleto del combustible; es incoloro, inodoro, insípido y un asfixiante tóxico que desplaza al oxígeno en el sistema respiratorio. Los vehículos contribuyen en promedio con el 90% del CO en la atmósfera.

Al ser inhalado se combina con la hemoglobina para producir carboxihemoglobina, la cual reduce automáticamente la capacidad normal de transportar oxígeno de los pulmones al cuerpo. En elevadas y continuas concentraciones durante largos periodos puede causar intoxicaciones agudas; la persona manifiesta dolor de cabeza y mareos; en casos extremos, puede llegar al estado de coma e incluso la muerte por el daño al sistema nervioso central. La concentración Inmediatamente Peligrosa a la Vida y a la Salud (IPVS) es de 1,200 partes por millón (ppm).

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Ocasionan efectos a la salud sólo si se combinan en el aire con otros elementos químicos para formar reacciones que producen aldehídos, cetonas, radicales alquilo y nitratos de peroxiacetilo (PAN), –un compuesto que provoca lagrimeo, conjuntivitis e irritación de nariz y garganta–. Dificultan la respiración, pues



también se combinan con la hemoglobina formando metahemoglobina que reduce la capacidad de transportar oxígeno a la sangre. La exposición a concentraciones superiores a 50 ppm produce intoxicaciones agudas; a los 21 días como máxima exposición, aparecen síntomas como debilitamiento progresivo, tos, dificultad para respirar y cianosis; a más de 300 ppm provocan cambios inflamatorios en los pulmones. Además, se dan casos de bronconeumonía y de edema pulmonar fulminante que pueden evolucionar en horas.

La recomendación de la Organización Mundial de la Salud (OMS) es una exposición máxima de 0.07 a 0.17 ppm promedio en una hora, y no debe rebasarse más de una vez al mes. En México la norma aprobada es de 0.21 ppm promedio horario (por hora), correspondiente a 100 IMECAS.

Hidrocarburos (HC) y NOx:

Son gases que reaccionan en la atmósfera con otras sustancias para formar oxidantes fotoquímicos incluyendo el ozono. Los oxidantes fotoquímicos son los principales componentes del smog, causan irritación respiratoria, ocular y lacrimación, contribuyen con muchos tipos de malestares respiratorios y causan daños importantes a las cosechas y a la vegetación.

Plomo (Pb):

Es un tóxico acumulativo que afecta el sistema nervioso particularmente en los niños. La contaminación de plomo en la atmósfera se ha reducido significativamente desde la introducción de gasolina sin plomo; sin embargo, los vehículos aún contribuyen con el 30% de la contaminación por Pb atmosférico.

Este metal penetra al organismo por el aparato respiratorio, gastrointestinal y por vía cutánea. Del 30 al 40% del plomo inhalado por los pulmones se deposita a través de la sangre en diversos órganos. La mayor parte la absorbe el sistema óseo; su estancia o vida biológica se calcula en 2, 3 o más años. El resto se deposita en otros órganos como el hígado y el riñón, o se expulsa por el



excremento y la orina. La acumulación de plomo en el organismo llega a producir disminución de glóbulos rojos, daño renal y hepático, retraso mental en los niños y alteraciones en la fecundidad y el embarazo.

Cuando el nivel de plomo es de 80 a 100 $\mu\text{g} / \text{dL}$ de sangre (microgramos por decilitro), puede provocar convulsiones, saturnismo y hasta la muerte, incluso la evolución del cuadro clínico y la enfermedad letal puede ocurrir en menos de dos años.

Los niveles de plomo en la sangre usualmente pueden oscilar entre los 15 y 40 $\mu\text{g} / \text{dL}$ de sangre. La OMS considera como límite aceptable hasta 40, inaceptable de 41 a 60, y peligroso cuando rebasan los 60 $\mu\text{g} / \text{dL}$ de sangre. El promedio aceptable es de 20 $\mu\text{g} / \text{dL}$ de sangre. Los habitantes de la ciudad de México estamos en los límites. La norma aceptada, señala que no se debe rebasar los 1.5 $\mu\text{g} / \text{m}^3$ de aire en un periodo de tres meses.

Partículas de materia (PM):

Son partículas suspendidas que flotan o son arrastradas en la atmósfera en forma similar al polvo y al polen. Muchos tipos de partícula son dañinas para la salud humana. Los vehículos, principalmente los motores de diesel, se piensa que contribuyen con 16% o más de la contaminación por partículas en áreas metropolitanas.

Partículas suspendidas en su fracción respirable (PM-10):

Son partículas sólidas o líquidas dispersas en la atmósfera (su diámetro va de 0.3 a 10 μm) como polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen. La fracción respirable de PST, conocida como PM-10, está constituida por aquellas partículas de diámetro inferior a 10 micras, que tienen la particularidad de penetrar en el aparato respiratorio hasta los alvéolos pulmonares. Sus principales efectos a la salud son irritación en las vías respiratorias; su acumulación en los pulmones origina enfermedades como la silicosis y la asbestosis. Agravan el asma y las



enfermedades cardiovasculares. Los valores límite son para Partículas Suspendidas Totales (PST) de $260 \mu\text{g} / \text{m}^3$ (24 horas) y para Partículas fracción respirable (PM-10) de $150 \mu\text{g} / \text{m}^3$ (24 horas).

Bióxido de azufre (SO_2):

Es uno de los más nocivos contaminantes atmosféricos, afecta la salud, la flora, la fauna y los bienes inmuebles; se le conoce generalmente por su capacidad de inducir reacciones alérgicas, pero su mayor efecto en el hombre es la irritación de los ojos, la piel y el sistema respiratorio, donde puede causar serios daños en los pulmones. Las bajas temperaturas contribuyen a agravar sus efectos, principalmente el broncoespasmo –Cuadros crónicos agudos de broncoespasmos, rinitis y conjuntivitis–. Se ha comprobado que los efectos nocivos para la salud se presentan cuando el SO_2 rebasa los $300 \mu\text{g} / \text{m}^3$ (0.11 ppm) en promedio para 24 horas, durante 3 ó 4 días seguidos y la norma en México es de $349 \mu\text{g} / \text{m}^3$ (0.13 ppm) en promedio diario máximo.

Ozono (O_3):

Es un gas de elevada toxicidad y de acción rápida, pues con niveles de 1.5 a 2.0 ppm, luego de dos horas puede ocasionar reacciones temporales respiratorias y reducir la capacidad mental. Cuando son de 0.3 ppm, en un periodo de 8 horas, producen en cualquier persona irritación nasal y de garganta. A 0.05 ppm provoca una disminución en el volumen de la expiración forzada; en una concentración de 0.3 ppm, después de 30 minutos, provoca tos e irritación severa en el aparato respiratorio; 0.2 ppm durante 3 horas, reduce la agudeza visual, aumenta la visión periférica, disminuye la nocturna y altera el balance de los músculos que controlan la posición ocular. La OMS recomienda una concentración de 0.05 a 0.10 ppm por hora para preservar la salud pública; la norma máxima aceptada en México es de 0.11 ppm en promedio durante una hora, lo que corresponde a 100 IMECAS.



Tabla 2

Efectos sobre la salud comprobados en relación con la contaminación atmosférica

Agente contaminante	Efectos
Óxido de azufre	Agravamiento del asma y la bronquitis crónica Daño de la función pulmonar Irritación sensorial
Óxidos de azufre y partículas en suspensión procedentes de fuentes de combustión	Aumento a corto plazo de la mortalidad Aumento a corto plazo de la morbilidad Agravamiento de la bronquitis y las enfermedades cardiovasculares Papel contribuyente en la etiología de la bronquitis crónica y el enfisema Papel contribuyente en la enfermedad respiratoria en los niños Papel contribuyente en la etiología del cáncer de pulmón
Partículas en suspensión	Aumento en la frecuencia de enfermedad respiratoria crónica
Oxidantes	Agravamiento del sistema, el asma y la bronquitis Daño a la función pulmonar en pacientes con bronquitis o enfisema Irritación ocular y respiratoria Disminución del rendimiento de atletas Probabilidad incrementada de accidentes de vehículos de motor
Ozono	Daño en la función pulmonar Envejecimiento de la peroxidación de los lípidos y de algunos otros procesos relacionados
Monóxido de carbono	Disminución de la tolerancia de ejercicio en pacientes con enfermedad cardiovascular Aumento en la mortalidad general y la mortalidad por enfermedad isquémica del corazón Daño en la función del sistema nervioso central (no comprobado) Factor causal en la arteriosclerosis
Bióxido de nitrógeno	Factor causal en el enfisema pulmonar Daño a algunos mecanismos de defensa del pulmón como las células cebadas y los macrófagos, función pulmonar alterada
Plomo	Almacenamiento incrementado en tejidos y fluidos corporales Daño en la síntesis de hemoglobina y porfirina
Sulfuro de hidrógeno	Incremento en la mortalidad tras la exposición aguda Causa de irritación sensorial
Mercaptanos	Dolor de cabeza, náuseas y afecciones de los senos paranasales

[2]



Se han mencionado ya los principales contaminantes atmosféricos junto con algunos de sus efectos sobre la salud humana; aunque hay una gran variedad de síntomas que se asocian cotidianamente con la polución –malestares respiratorios, prolongación de las enfermedades en general y las respiratorias en particular, irritación e inflamación ocular– se sospecha que algunas consecuencias pueden ser mucho mayores como alteraciones en el desarrollo, enfermedades nerviosas e incluso alteraciones a nivel genético. ^[3]

Además de afectar la salud humana en forma inmediata la contaminación provoca daños al ambiente que redundan en un deterioro a mayor escala de la calidad de vida de los seres humanos y en perturbaciones nocivas a la biósfera en general.

Al ambiente:

Los efectos de alterar el “equilibrio ecológico” son ya perceptibles en puntos tan alejados de las grandes ciudades –que son uno de los principales focos de contaminación– como las regiones polares; en estas se descubrió un “agujero” de gran tamaño en la capa de ozono que protege a la tierra –y a los seres vivos que en ella viven– de la penetración de los rayos ultravioleta que provienen del sol. Estos rayos ultravioleta son los responsables del cáncer de piel debido a las exposiciones inadecuadas al sol pero también, más grave aún, son el impulsor de las mutaciones que, mientras en épocas pasadas fueron determinantes para la evolución, ahora sin control amenazan con dañar severamente el material genético de los seres vivos, en especial el humano.

De forma más inmediata algunos efectos de la contaminación atmosférica se perciben como una “lluvia ácida”, (que ocurre como resultado de las emisiones de NOx y SO₂ que son transformados en la atmósfera terrestre y devueltos a la



superficie como depósitos secos, humo, nieve o por la lluvia) que ha sido capaz de disolver rostros de piedra caliza de esculturas antiguas en ciudades europeas, dañar cultivos o modificar el pH en embalses de agua y mantos freáticos, afectando además la flora y la fauna del lugar.

Este mismo efecto sobre la flora y la fauna se percibe como resultado de la introducción de metales pesados en los ecosistemas; los metales como el plomo y el mercurio –introducidos por los automotores y por algunas explotaciones mineras– se fijan en los seres vivos durante largos periodos alterando su metabolismo y transmitiéndose a lo largo de las cadenas alimenticias llegando incluso hasta los seres humanos.

Tabla 3

Algunos contaminantes y algunos de sus efectos sobre el ambiente

CO ₂	Calentamiento global, cambio del clima en regiones geográficas completas, aumento en el nivel del mar, aumento en la incidencia de huracanes y otros fenómenos atmosféricos dañinos, proliferación de especies nocivas.
SO _x y NO _x	Lluvia ácida, destrucción de bienes materiales, aumento en la erosión.
CFC	Clorofluorocarbonos. Destrucción de la capa de ozono.
Metales pesados, Insecticidas y otras sustancias	Deficiencias en el desarrollo de los animales. Envenenamiento de las cadenas alimenticias, pérdida o debilitamiento de especies animales.
Deforestación	Pérdida de especies vegetales y animales, aumento de la contaminación por partículas debido a la erosión.

1.1.2. Algunos de los costos producidos por la contaminación.

Todos los efectos de la contaminación tienen un costo que puede o no ser visible, pero siempre es cuantificable ya sea por una consecuencia directa o como un beneficio que se deja de percibir en algún nivel de la escala de valoración humana. Algunas de las consecuencias que se han mencionado son los perjuicios ambientales en los que, para obtener una cuantificación económica, se pueden



considerar los costos de corregir, paliar o indemnizar a los afectados por cada suceso, por ejemplo:

En los casos de daños ambientales debidos a accidentes con sustancias peligrosas se exige en muchos países, –en teoría México incluido–, que se realice la descontaminación y la reintroducción de las especies afectadas hasta restaurar el equilibrio ecológico de la zona dañada. Esta restauración es extremadamente costosa cuando se realiza debidamente pero permite una aproximación económica a la magnitud de los daños efectuados sobre el ambiente. Otras aproximaciones económicas se pueden obtener cuantificando en la proporción adecuada los gastos que se producen por la modificación del clima esperado atribuible a la contaminación.

Como ejemplo se puede considerar que, debido al calentamiento global, se ha incrementado el número y la intensidad de huracanes por año. Si se obtiene un costo promedio por los daños que provocan estos huracanes adicionales^β, ya sea como daños materiales o pérdidas humanas, se puede aproximar este valor como un costo derivado de la contaminación.

Por este mismo efecto de calentamiento global se podría esperar un aumento en el nivel de los mares provocando una inundación costera generalizada proporcional a dicho calentamiento, donde, proporcionalmente también, se verían afectadas las personas y los bienes materiales generando gastos por daños, reubicación, atención médica o pérdidas materiales y humanas.

La lluvia ácida, los metales en el ambiente, las partículas de materia o la deforestación, pueden provocar daños a la flora y a la fauna, a la tierra, a los inmuebles y a la salud humana; todos estos daños aumentan proporcionalmente

^β (Costo que puede fácilmente ascender a 300 millones de USD por huracán)^[Según el Discovery Channel]



con cada uno de los contaminantes –generando también gastos y costos proporcionales– muchos de los cuales no son siquiera cuantificables, como pérdida de cultivos, costos en los sistemas de salud, gastos de restauración de inmuebles, limpieza, pérdidas por la baja del turismo o desestabilización de la biósfera donde al perder una especie animal especializada se suele dar la proliferación de una especie animal que consideramos nociva lo que implica un costo de corrección, más los daños que esta especie genera, y así sucesivamente.

Se mencionan algunas de estas implicaciones a corto y a largo plazo sólo a modo de referencia. El alcance real nos es desconocido en la misma medida en que ignoramos todas las interrelaciones de las diversas variables que contribuyen al medio ambiente en el planeta^x.

Costos evaluados según la perspectiva mundial.

La variedad de efectos que provoca la contaminación es enorme así como sus consecuencias y, por ende, los costos; hasta ahora se han planteado costos que son el resultado de las consecuencias que produce la contaminación en forma global, costos indirectos; aún así, basta con restringirse a algunos de los efectos principales y de corto plazo, costos directos, para obtener una aproximación económica y de conveniencia significativa.

A modo de referencia: se estima que se gastan directamente para el control de la contaminación en EUA aproximadamente 60 dólares al año por habitante (USD \$15,000 millones aproximadamente), en Reino Unido 17 USD por habitante y en

^x {Es nuestra esperanza que la desestabilización del equilibrio ecológico no sea tal que ya no permita a los mecanismos autoreguladores de la naturaleza restaurar las condiciones necesarias para mantener la vida y la biodiversidad.}



Francia 12 USD. ⁽⁴⁾ Estos costos pueden ser por equipo anticontaminación, su mantenimiento o su administración.

Algunos de los principales parámetros que se han empleado mundialmente para cuantificar los costos derivados sólo de la contaminación atmosférica son:

Por sus efectos sobre la salud y la vida humana: costos por atención médica, por pérdida de productividad, por inasistencia al trabajo, por paros de actividades, por ineficiencia, por medicamentos, por la muerte de la persona, pagos por incapacidades médicas y otras.

Se pueden considerar también las pérdidas de vidas, y los efectos directos o indirectos, sobre el ganado y las plantas, la corrosión de materiales y sus revestimientos de protección, gastos de mantenimiento en interiores y exteriores de inmuebles y la depreciación de objetos y mercancías expuestos, también se pueden considerar las pérdidas por la combustión incompleta en los hogares o en las instalaciones industriales de los residuos que contribuyen a la contaminación; así como los gastos ocasionados directamente por aplicación de medidas técnicas, materiales, administrativas o de investigación para reducir la contaminación.

Para obtener un panorama completo hay que considerar también los efectos por contaminación no atmosférica, como contaminación del suelo y del agua, y problemas como la erosión —a la que contribuye en gran medida la deforestación—.

Tabla 4

Algunos parámetros empleados para cuantificar los costos producidos por la contaminación

En la salud humana:	
	Atención médica
	Jornadas laborales perdidas
Partículas	Enfermedad y Mortalidad
Ozono	Enfermedad
Plomo	Tratamiento de niños con altos niveles en la sangre Educación Compensatoria Hipertensión en adultos Infartos al miocardio
	Pérdida de producción
En los bienes materiales:	
	Pérdidas de cultivos
	Pérdidas en el ganado
	Daños a inmuebles
	Gastos de mantenimiento y limpieza
	Gastos en administración, control e investigación
	Depreciación de bienes diversos
	Pérdidas por empleo incompleto de las combustibles
Pérdidas por contaminación no atmosférica:	
	Contaminación y pérdida de suelo
	Erosión
	Contaminación del agua y las enfermedades que ocasiona

[5]

Evaluación para la ZMCM

Por lo anteriormente expuesto se puede afirmar que la contaminación no se debe considerar una cuestión de moda sino un asunto de importancia relevante —en Inglaterra existe legislación contra la contaminación atmosférica desde el siglo XVIII—, la característica que lo hace apremiante es el hecho de que incluso en la economía de corto plazo se reflejan los efectos de esta contaminación. La contaminación tiene un costo que pagamos todos, unos más otros menos, este costo es cuantificable y tiene repercusiones mas allá de las óbvias.



Algunos de estos costos –los principales– están relacionados con la salud humana; inclusive en una mentalidad de corto alcance como la que parece predominar en el mundo actual, es sensible el costo que implica que los empleados se ausenten más prolongada y recurrentemente si se encuentran en ambientes contaminados que si no lo están.

Como un método para obtener una valoración económica se ha desarrollado una fórmula matemática que arroja un valor monetario para el tiempo que los empleados pierden a causa directa de la contaminación. Se desarrolla, como ejemplo en este caso específico, para cuantificar la ventaja de la reducción de las emisiones de GLP a la atmósfera con sus consiguientes contaminantes; de ozono en esta descripción particular, por medio de una serie de medidas y precauciones; tomado de una memoria técnica de estudio de PEMEX de 1997.^[6]

Esta valoración económica se obtiene multiplicando el monto del salario mínimo con los días de actividad restringida –días en que se presentan malestares que limitan a las personas– a causa de problemas respiratorios (DARR) y con la proporción de estos en que se considera que la enfermedad es tan grave como para provocar la inasistencia al trabajo.

$$\text{Valor} = \text{SalarioMínimo} \times \text{DARR} \times \text{FracciónGravedad}$$

donde:

$$\frac{\text{DARR}}{\text{adulto} \cdot \text{año}} = e^{[(a \times z + b \times (\text{ozono})^c)]}$$

y donde:



DARR: Días de actividad restringida debidos a problemas respiratorios

Ozono: Máxima concentración horaria de ozono al día.

c: varía entre 0.5 y 2

a y b: parámetros estimados

z: otras variables independientes.

Se cita textualmente: "Para el caso de México se considera $c = 1$ y $b = 6.883$. Por lo tanto la reducción del DARR producida por esta medida *{la reducción arriba propuesta de emisiones de GLP a la atmósfera}* está dada por:

$$\frac{\Delta DARR}{año} = DARR_0 \times Adultos \times Población \times e^{[6.883 \times \Delta O_3]}$$

en donde:

$DARR_0$ = DARR actual. En este caso se consideró el DARR de 1991 según la Secretaría de Salud = 3

Adultos = Porcentaje de adultos en la población total

Población = Población total en la ZMCM = 16,400,000 habitantes

ΔO_3 = Cambio en la concentración del máximo diario del promedio horario de ozono medido en ppm = 0.001ppm

Con los datos anteriores se obtiene:

$$\Delta DARR / año = 186,896 \text{ DARR}$$

Si se considera que solamente el 50% de estos días los síntomas respiratorios son suficientemente graves como para evitar que la persona afectada asista a su trabajo y considerando el promedio de los salarios mínimos generales y



profesionales vigentes para la ZMCM que es de \$32.11 diarios, se encuentra que la aplicación de esta medida {la citada reducción en emisiones de GLP} provocaría beneficios en la salud de los ciudadanos de la ZMCM por \$3,001,000 / año.”

Lo anterior se transcribe porque obtiene que para una reducción de 0.001 ppm promedio de ozono se logra una disminución en los días de actividad restringida por año de 186,896 días, en ese momento económicamente equivalente a más de 3 millones de pesos al año, sólo para uno de los contaminantes. De esta forma se obtiene una aproximación rápida sobre los beneficios monetarios de una reducción en la contaminación atmosférica.

Se desprende de lo anterior que para una reducción en las emisiones de algunos contaminantes se obtiene un beneficio económico directo al cual hay que agregar los diversos beneficios no contemplados.

Existe un estudio donde se consideran estos y otros datos para calcular el costo anual producido por la contaminación atmosférica entre otras; el resultado se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5
Sumario de costos ambientales en México

Problema	Efectos potenciales	Método / fórmula	Costo anual (miles millones de USD)	Suposiciones
Erosión del suelo	Pérdida en la producción agrícola	Pérdida promedio en la productividad X producción (soya, maíz, sorgo y trigo) + fertilizantes	1.20	Aplicación de la tendencia de las pérdidas proyectadas en EUA más 20% por fertilizantes



Problema	Efectos potenciales	Método / fórmula	Costo anual (miles millones de USD)	Suposiciones
Efectos en la salud debidos a la contaminación del aire (sólo en la Ciudad de México)	Partículas: Enfermedad (días de actividad restringida)	$\Delta \text{DARR} = 0.0114 \times \text{DARR base} \times \text{norma para la concentración de partículas}$	0.36	Pérdida diaria = 32 USD concentración de partículas finas = $119 \mu\text{g} / \text{m}^3$ Estándar de partículas finas = $50 \mu\text{g} / \text{m}^3$ DARR base = 3
	Partículas: Mortalidad	$\Delta \text{mortalidad} = 1.69 / \text{millón} \times \text{concentración de partículas suspendidas}$	0.48	Conc. de PS = $298 \mu\text{g} / \text{m}^3$ Una vida estadística = 75,000 USD.
	Ozono: Enfermedad	$\Delta \text{DARR} = \text{base} \times \text{población adulta} \times \exp\{(6.88 \times \Delta \text{Ozono}) - 1\}$	0.10	50% de perdida de productividad + algunas de las suposiciones anteriores.
Efectos en la salud debidos a la contaminación del aire (sólo en la Ciudad de México)	Plomo: Tratamiento de niños por altos niveles de plomo en la sangre	$\text{Población afectada} \times \text{costos estimados promedio del tratamiento}$	0.06	Monitoreo si $> 25 \mu\text{g} / \text{dL}$ Prueba EDTA si $> 35 \mu\text{g} / \text{dL}$ 1% requiere eliminación por complejación. Costo del hospital = 1/15 del costo en EUA.
	Plomo: Educación compensatoria para niños.	$\text{Población afectada} \times \text{costo de la educación}$	0.02	20% de aquellos $> 40 \mu\text{g} / \text{dL}$ Presupuesto promedio de educación por niño.
	Plomo: Hipertensión en adultos	$\text{Población afectada} \times \text{costo promedio estimado del tratamiento}$	0.01	$\Delta 1 \mu\text{g} / \text{m}^3$ de plomo en el aire = $\Delta 3 \mu\text{g} / \text{dL}$ en la sangre $\Delta 1\%$ del nivel de plomo en la sangre = $\Delta 0.8\%$ de probabilidad de hipertensión. Concentración de plomo en el aire = $1.4 \mu\text{g} / \text{m}^3$ Nivel de plomo en sangre promedio = $15 \mu\text{g} / \text{dL}$
	Plomo: Infartos al Miocardio	Igual que el anterior	0.04	60 % de ocurrencia en hipertensos Costos = $\frac{1}{2}$ de EUA
Otros costos.....				

[7]



En la tabla 5, calculada en julio de 1994 por Sergio de Margulis, como un complemento a un estudio realizado en 1986 y presentado en el World Bank Report se obtiene una cifra conservadora {según la misma fuente} sobre el costo de la contaminación atmosférica en la ZMCM, esta cantidad asciende a casi mil millones de dólares anuales considerando solamente partículas de materia, ozono y plomo.

¿Qué tan confiables son estos valores?

Estos valores no forzosamente reflejan un gasto que se realice en la ZMCM puesto que ya bastantes deficiencias hay en la educación para niños con insuficiencias nutricionales como para brindar una educación compensatoria especializada para niños con "exceso" de plomo en la sangre. Además se presupone también un grado de atención médica como en los EUA, aunque a un precio menor, y considera que el precio de una "vida laboral" (o su pérdida) asciende a 75,000 USD aproximadamente.

Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, permiten cuantificar aproximadamente los costos de la contaminación como una cantidad que habría que aportar si se quisiera solucionar el problema.

Adicional a las dos estimaciones anteriores se pueden aplicar a la ZMCM algunos otros parámetros como son los costos reportados por la SSA, por el INE y por otras dependencias gubernamentales que permiten aproximar un costo para la contaminación. Un estudio así fue realizado por la Asociación Mexicana de Gas Natural (AMGN) publicado en su Boletín # 1 ^[8], del que se transcriben algunos puntos importantes:



“La contaminación que se genera en la Ciudad de México y área conurbada (ZMVM) es de 8,207 toneladas al día (según el inventario de emisiones del DDF); el transporte contribuye con el 75% de este total (el parque vehicular es de 3.21 millones, aproximadamente).

Un vehículo particular recorre en promedio 27 kilómetros diarios, si en la ZMVM existen 2.39 millones, la distancia total anual promedio es de alrededor de 22 mil millones de kilómetros anuales. En contraste con los **vehículos de uso intensivo**, que recorren en promedio 184 kilómetros diarios, si en la ZMVM existen 660,000, la distancia total anual promedio es de alrededor de 38 mil millones de kilómetros anuales. Los vehículos de uso intensivo contribuyen con el 50% de los contaminantes, aproximadamente, es decir, **el 21% del parque vehicular genera la mitad de las emisiones.**

Por cada vehículo convertido a gas natural, se reduce la emisión de monóxido de carbono en un 99%, de hidrocarburos el 87% y de óxidos de nitrógeno 37%. **Esto implica reducir a la mitad los actuales índices de contaminación en la ZMVM.**

Con consecuencia en los altos niveles de contaminación que se presentaron durante seis días de 1996 en la ZMVM, se gastaron en el sector salud alrededor de **417.9 millones de pesos**. Para fines de comparación con **375 millones de pesos se instalan 10 Estaciones de Servicio y convierten 10 mil unidades.**

Adicionalmente, según estimaciones del Instituto Nacional de Ecología, el impacto a las finanzas públicas por cada día de contingencia ambiental representa **\$7.36 millones de dólares**. Si se considera que durante 1999 se presentaron tres contingencias, con una duración de 5 días, el Gobierno Federal tuvo erogaciones por **36.8 millones de dólares** adicionales. Con este monto se construirían 9



Estaciones de Servicio más y se convertirían 6,612 unidades adicionales, aproximadamente.

El Banco de México realizó en 1992 el estudio "Back to the Envelope Estimates Of Environmental Damage Cost in México", que cuantifica el detrimento a la salud debido a partículas suspendidas y ozono, {Se refieren aquí al estudio citado ya anteriormente del WBR} dando por resultado que el costo a la salud ascendió a 838 millones de dólares y 102 millones de dólares respectivamente, totalizando **940 millones de dólares.**

Según el libro "Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000", editado por la SEMARNAP, se presentan varias sintomatologías asociadas a episodios de Contingencias Ambientales, tales como cefalea, conjuntivitis, tos productiva, disnea, odinofagia o disfonía. Con la finalidad de estar en posición de valorar estas sintomatologías se ha considerado que la atención médica la realiza un médico familiar del Sector Salud, según datos de la Secretaría de Salud, este tipo de consulta tiene un costo de \$8.42 dólares americanos.

En un escenario en el que se tiene una contingencia con un nivel entre 250 a 299 IMECA, representa un costo de 89.4 millones de dólares; si ésta tiene una duración entre 1 y 2 horas, la contingencia representa un costo de 43.3 millones de dólares adicionales y si su duración se extiende por más de 24 horas (correlacionado con un nivel IMECA de 200 a 249), representa un costo adicional de 49.4 millones de dólares. En este escenario de contingencia ambiental (relacionada con el nivel IMECA), se tiene un costo total de **182.2 millones de dólares.** Si se llegan a presentar cinco contingencias al año, tal como ha ocurrido, el gasto total representa **919.9 millones de dólares.**

Autor: Asociación Mexicana de Gas Natural. Vicepresidencia de Gas. Natural Vehicular. Sección del Estudio Gas Natural de Uso Vehicular vs. IEPS. Abril 2000."



Según se puede observar los montos económicos que se manejan no son en lo absoluto despreciables. El siguiente cuadro refleja esta afirmación:

Tabla 6
Costos por la contaminación estimados según diversas fuentes

Fuente	Caso o año	Monto económico (en USD)
Sector Salud	1996	(418 Millones de pesos) 40 Millones USD aprox.
INE, Instituto Nal. De Ecología	1999	37 (Millones USD)
WBR, sólo por PM y Ozono	Cada año	940 (Millones USD)
SEMARNAP	Escenario Típico	920 (Millones de USD)
Suma aproximada:		1,937 Millones de USD / año en la ZMCM

¿Para qué se obtiene un aproximado del costo producido por la contaminación?

Ya sean 40 o más de 2 mil millones de dólares al año –equivalente a aproximadamente dos veces los ingresos anuales de la Universidad Nacional Autónoma de México,¹⁹⁾– dependiendo de la fuente y el caso al que se le dé credibilidad, este es el margen económico mínimo disponible para la ZMCM en caso de que sea posible reducir la contaminación atmosférica. Esto significa que cualquier gasto por una acción que reduzca efectivamente la contaminación puede ser en realidad un ahorro o, por lo menos, una inversión. Hay que agregar que usualmente las cifras reportadas se consideran desde el punto de vista conservador y sin considerar otros factores agravantes.

1.2. Disponibilidad, eficiencia y costos de los combustibles

Se ha planteado hasta el momento el severo inconveniente que representa la contaminación –resultado de las actividades humanas en su mayoría– junto a una aproximación a algunos de los costos implicados. Para completar el panorama se



hace necesario considerar si todos estos efectos son consecuencia del aprovechamiento eficiente de la energía o si es posible obtener la misma cantidad de energía con menos contaminación e incluso con beneficios económicos adicionales resultado del mejor empleo de las fuentes tradicionales de energía.

1.2.1. Estimado sobre disponibilidad

Es de todos conocido el hecho de que las reservas de los pozos de petróleo son finitas y se estima que al ritmo actual de crecimiento en el consumo energético durarán aún entre 160 y 200 años más; el petróleo es un recurso no renovable, pues su formación requirió de millones de años y condiciones especiales de temperatura, presión y grandes cantidades de materia orgánica para transformarse en el hidrocarburo que conocemos en la actualidad; mas allá de la simple cuestión sobre cuanto tiempo durará esta forma de energía, es importante considerar cuál es el mejor uso al que se le puede destinar. Como se mencionará mas adelante, los hidrocarburos se pueden emplear para una gran diversidad de aplicaciones que van desde su simple combustión hasta la obtención de alimento y plásticos. El quemar hidrocarburos para obtener energía es una práctica ampliamente extendida alrededor del mundo, sin embargo este es uno de los usos más simples para los que se les puede emplear. La combustión destruye la molécula para obtener la energía que aprovechamos, pero es posible emplear otras fuentes de energía que no impliquen la destrucción de moléculas tan complejas y con tan variados usos. La transformación del petróleo y sus derivados a productos útiles —desde láminas plásticas para la construcción hasta medicamentos—, es preferible a su destrucción. Esto es cierto en mayor grado mientras más grande es la molécula y por lo tanto más compleja.



Por esto es prioritario hallar fuentes alternativas viables de energía, preferentemente renovables, que permitan un abasto suficiente, diverso, limpio y seguro para cubrir las necesidades humanas. Actualmente se discuten diversas formas de energías alternativas que, a excepción de la nuclear y tal vez la geotérmica, provienen directa o indirectamente del sol.

1.2.2. El gas natural

El gas natural es una alternativa como fuente de energía para sustituir a los derivados mas pesados del petróleo no sólo debido a sus características ambientalmente favorables sino también porque debido a su abundancia y a su posible producción implica grandes ventajas económicas.

Las reservas de GN mundiales se estiman en 4,933,572 miles de millones de pies cúbicos según datos de 1995 ^[8], que al ritmo actual de crecimiento deben garantizar un abasto por 60 años aunque se estima que este llegará a 200 años.

Estas reservas mundiales se encuentran distribuidas de la siguiente forma:

Tabla 7
Reservas probadas mundiales de gas natural (1995)
(miles de millones de pies cúbicos)

País	1995
CEI	1,977,000
Irán	741,609
Qatar	250,000
Emiratos Arabes	204,600
Arabia Saudita	185,400
Estados Unidos	163,837
Venezuela	139,900
Argelia	128,000
Nigeria	109,710

Pais	1995
Iraq	109,500
Indonesia	68,916
México	68,413
Malasia	68,000
Canadá	67,027
Kuwait	52,400
Noruega	47,498
Subtotal	4,381,810
Resto del mundo	551,762
Total	4,933,572

[8]

Correspondiendo a México el 1.39% de las reservas totales en el mundo.

Es de esperar que con la difusión en su empleo –a nivel doméstico, industrial y vehicular– en el mundo se mejoren los procesos para producirlo en forma eficiente y económicamente costeable.

1.2.3. Estimados para fuentes limpias

Casi toda la energía que empleamos, incluyendo la alternativa, proviene del sol –o provino de él– de una u otra forma; la leña, el carbón, el petróleo, el gas, pero hay diferencias importantes en los efectos de su empleo sobre el ambiente.

Las formas de energía alternas y renovables más discutidas en la actualidad son: energía eólica, energía de las mareas, energía solar, energía hidroeléctrica, energía geotérmica o combustión en celdas electroquímicas; además, hay que considerar a la energía nuclear, que aunque muy discutida es perfectamente viable con sólo emplear los procesos correctos y las medidas necesarias de seguridad. En Francia la mayor parte de la energía eléctrica se produce de esta forma.



Las formas de energía antes mencionadas aunque con una gran proyección ambiental tienen una participación baja real en la producción de energía eléctrica. Por ejemplo el carbón provee el 55% del mercado de generación eléctrica, la fuerza nuclear el 22%, la hidroeléctrica el 10%, el gas natural el 9%, el petróleo el 3% y la fuerza geotérmica el 0.5% ^[8].

Prácticamente todas estas fuentes de energía se enfocan a la obtención de electricidad (una de las formas más versátiles y eficientes de la energía, al contrario del calor que se considera elemental ya que cualquier transformación energética tiene por resultado la liberación de este último que no es completamente aprovechable).

Aunque los automóviles eléctricos son ya una realidad (incluso en la UNAM y en los que, en Japón, se han obtenido velocidades de hasta 300 km / h) la tecnología de almacenamiento y producción de electricidad para éstos no se encuentra desarrollada del todo. Los problemas en cuanto al peso y volumen de las baterías recargables, su disposición final, la velocidad de recarga y otros factores permiten calcular que no se encontrarán ampliamente difundidos sino hasta dentro de al menos 10 años.

Para el caso de los vehículos se está trabajando sobre muy diversas fuentes de energía alternativas a la gasolina y el diesel. Se plantean como opciones el gas natural, el GLP, el hidrógeno, la electricidad de baterías de celdas solares y de celdas de combustible, el amoníaco (bajo la siguiente reacción: $4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$), aceites vegetales (de coco, sésamo, girasol, palma o soya) o el dimetil éter (DME, un analgésico). ^[10]

La tecnología de celda de combustible es una de las más eficientes que se conocen –implica la combustión directa sobre un catalizador, generalmente en



medio acuoso, permitiendo la oxidación con electrodos del combustible para obtener los productos finales de combustión y la energía en forma de electricidad pero sin pérdidas por calor, luz u otros medios—. En estas celdas de combustible se pueden emplear desde combustibles tradicionales (incluyendo gas natural y gasolina) hasta hidrógeno (donde el único producto de desecho es vapor de agua perfectamente puro). El único inconveniente que presentan estas celdas es que requieren de reactivos puros que no envenenen los catalizadores con lo que resulta un gran aumento en los costos.

La energía eólica pretende el aprovechamiento de la energía cinética del viento, que se genera por los cambios de temperatura debidos al sol en todo el planeta y a la rotación terrestre, transformándola en energía eléctrica mediante un turbogenerador bajo el principio de una dinamo.

Cabe mencionar que esta transformación a energía eléctrica a partir de un turbogenerador impulsado por alguna otra fuente es la práctica más común en la obtención actual de electricidad.

En las plantas termoeléctricas se queman combustibles fósiles para liberar el calor *{recordar que es la forma más ineficiente de la energía}* y calentar agua o vapor para que este a su vez mueva una turbina que al rotar genere electricidad. Aún la energía nuclear funciona con el mismo principio donde la única diferencia se encuentra en que la fuente de calor es el material producido por la fisión atómica. Este calor brinda presión al vapor que mueve una turbina que hace girar una dinamo para generar electricidad.

En la energía geotérmica se aplica el mismo funcionamiento con la salvedad de que la fuente de calor proviene de la energía contenida en el subsuelo terrestre.



Incluso la energía hidroeléctrica –que se encuentra enfrentada a su posible desaparición por los impactos ambientales que producen las presas– se basa en el principio de los magnetos o los conductores rotatorios impulsados por el agua a presión al ser liberada cauce abajo.

Claros excepciones al principio del calentamiento y el turbogenerador son las celdas fotovoltaicas de generación de electricidad que convierten directamente la luz en electricidad y las celdas de combustible que llevan a cabo la reacción química de forma tal que casi toda la energía se libera en forma de electricidad.

1.2.4. El Ciclo Completo de la Energía

El consumo de todas las formas de energía afecta nuestro ambiente, directa e indirectamente, este impacto se asocia generalmente con el aire pero hay que considerar al aire y al agua. Este impacto puede ocurrir en el punto de consumo o puede tomar lugar en varios puntos durante la extracción, el procesamiento, la conversión, la transportación o la distribución de la energía.

Aunque el ahorro de la energía puede efectivamente aumentar la calidad ambiental, esto no es una respuesta completa. Se debe buscar también reducir el impacto asociado con las formas de energía convencionales y renovables. Sin embargo, como una nota de precaución: el costo para la economía de la conservación de la energía así como la sustitución por combustibles ambientalmente preferibles debe pasar un examen económico. Este examen puede ayudar a asegurar un mejor conjunto de acciones que apoyen las metas ambientales y brinden costos competitivos a los consumidores de la fuente energética en caso de que sean adoptadas.



Cuando se consideran todos los tipos de impacto ambiental el gas natural se yergue como una forma superior de energía. Quemar gas natural puede ayudar a superar muchos de los retos de conservación ambiental de la actualidad.

Como es fácilmente apreciable, mientras menos transformaciones sufra la energía y menor distancia recorra mayor será la eficiencia obtenida. Dicho de otra forma, una mayor fracción de la energía liberada podrá ser aprovechada.

Comparación de la eficiencia.

Para englobar esta idea se ha creado el concepto de "ciclo completo de energía" que considera la diferencia en la energía extraída de la fuente y la entregada al consumidor final. Baste mencionar que en el paso de la energía a través de un turbogenerador impulsado por calor en casi todas las centrales eléctricas se pierden dos terceras partes de esta energía (67%) ^[8] resaltando así la ineficiencia de este mecanismo.

Algunos de los valores típicos para la eficiencia son desde el punto de vista del ciclo completo de energía:

- Energía termoeléctrica: <30% La disminución en la eficiencia se debe al turbogenerador que es impulsado con vapor.
- Geotérmica: <30% Emplea turbogenerador impulsado con vapor.
- Hidroeléctrica: >60% Emplea hidrogenerador pero no usa calor.
- Nucleoeléctrica:<30% Emplea turbogenerador y dos circuitos de vapor.
- Celda de combustible: 90-95% (pero obtenida en el lugar, hay que agregar el costo debido al transporte de reactivos y la energía empleada en obtenerlos con la pureza requerida).



- Gas natural: 95% en su estado natural, donde la pérdida neta del 5% es por la transportación. En el caso del gas natural licuado (GNL) o el gas natural comprimido (GNC) la pérdida es de aproximadamente el 20% adicional debida a la compresión o a la licuefacción –es, con todo, la forma más eficiente–.
- Gasolina y Diesel: Existe un alto costo energético para su separación del petróleo, refinación. La magnitud se puede aproximar por la diferencia del costo real –no subsidiado– comparado con el GN por la misma cantidad de energía entregada.

Comparación de emisiones.

El consumo de gas natural emite una menor cantidad de CO₂ en comparación con todos los demás combustibles fósiles, aproximadamente el 45 por ciento menos que el carbón y 30 por ciento menos que los productos del petróleo. ^[8]

Por ejemplo, para el caso del CO₂ las emisiones atribuibles a una aplicación considerando el ciclo completo de energía y el contenido de carbono de cada combustible son: 206 libras por MMBTU para carbón, 170 libras por MMBTU para productos de petróleo y 115 libras por MMBTU para el gas natural. Aún en el caso de la energía eléctrica es necesario considerar cuál es su fuente para poder determinar adecuadamente su conveniencia⁷. ^[8]

En el caso del costo de los combustibles empleados para transportación hay que considerar diversos factores siendo dos de los principales el impacto ambiental y el costo. Este costo debe considerar el ciclo completo de energía. Bajo esta perspectiva el GN es una alternativa superior a la gasolina y al diesel.

⁷ (MMBTU = Miles de millones de BTU – British Thermal Unit - Una unidad energética mundialmente empleada.)



A nivel mundial el precio del GN es menor que el de la gasolina y el diesel, aunque mayor que el del carbón, que se emplea para producir electricidad. –Cabe mencionar que, sin embargo, el GN está sustituyendo al carbón, no sólo por sus ventajas ambientales sino porque considerando los costos de mantenimiento el GN resulta a la larga, más económico–.

En los vehículos a GN, desde un punto de vista conservador, se reducen las emisiones de HC en 40% y de CO en 50%. Con tecnologías más actuales de conversión a GN es posible alcanzar reducciones del 87% en HC y 82% en CO. Los vehículos a gas construidos y optimizados en la fábrica han alcanzado la reducción del 90% de HC y de CO con reducciones del 30% en NOx y con casi ninguna partícula. [1]

Con estos datos se puede obtener un cuadro donde tomando en cuenta la eficiencia, el precio y la disponibilidad se ordenan los diferentes combustibles de acuerdo a su superioridad económica:

Tabla 8
Conveniencia de diferentes combustibles

Combustibles	Eficiencia
Gas natural	Su eficiencia energética real es del orden del 95% en aplicaciones industriales y del 80% para automotores (la diferencia se debe a la energía requerida para la compresión o la licuefacción). Es el combustible con menores emisiones en sus productos de combustión y es el más económico, al considerar el ciclo completo de energía.
Gas Licuado de Petróleo	Su composición ideal es de arriba del 90% de propano, resultando así en un combustible altamente eficiente y con pocas emisiones en sus productos de combustión. Sin embargo, debe ser refinado del petróleo por lo que su fabricación requiere de una considerable inversión de energía; por esta razón su costo es mayor. –Además, en México el contenido de propano es de aproximadamente el 60%, lo que disminuye en gran medida sus ventajas como combustible para transportación–
Diesel	Ampliamente usado. Debe ser refinado del petróleo. Emite una gran cantidad de partículas de materia.



Combustibles	Eficiencia
Gasolina	Requiere refinación y su composición es variable. Comparado con el GN su costo es mayor. Sus emisiones también.
Celdas de combustible	Se estima que estén disponibles comercialmente en automóviles para el 2004, <i>(según dato de 1999)</i> . Es altamente eficiente (>90%) pero requiere de la adición de reactivos puros, con el consiguiente aumento del costo por purificación.
Hidrógeno	Relacionado con las Celdas de Combustible, ya que su combustión tradicional para liberar calor es ineficiente.
Electricidad	Disponible económicamente en más de 10 años. Ya sea con una batería recargada con fuentes renovables o empleando producción inmediata (paneles solares). La recarga partiendo de fuentes tradicionales es muy ineficiente.
Otros Alternativos	Su costo es mayor, o se produce a partir de alguno de los anteriores.

Algunos de los puntos aquí mencionados serán tratados más adelante.

Es pertinente llamar la atención sobre los autos eléctricos y considerar que aún si son producidos eficiente y económicamente, si su recarga es a partir de las tomas de energía eléctrica normales –energía que es resultado de la combustión de productos fósiles en su mayoría, y además obtenida en procesos altamente ineficientes– podría resultar contraproducente su empleo, ya que sólo se está trasladando el foco de contaminación, aumentando además la energía requerida y las emisiones contaminantes netas al ambiente.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto se puede afirmar que el gas natural como fuente de energía es la opción más viable en forma inmediata, más conveniente económicamente y con menor impacto ambiental una vez que se ha considerado el Ciclo Completo de Energía.



☺ 2. Características y propiedades del gas natural

2.1. ¿Qué es el GN?

Definición, Composición, propiedades

Datos generales

El gas natural es una mezcla gaseosa estable de hidrocarburos y no hidrocarburos compuesta principalmente por metano, típicamente por encima del 70%, aunque por lo común contiene al menos el 90%; se le da también este nombre al metano casi puro que puede contener alguno de los siguientes componentes: etano, propano e hidrocarburos más pesados, nitrógeno, oxígeno, bióxido de carbono, compuestos de azufre, agua, hidrógeno y helio así como indicios de neón, argón y emanación de radio en diferentes proporciones. La composición varía en cada lugar de extracción, por ejemplo:

Tabla 9
Diferentes composiciones típicas

		MAR DEL NORTE	ARGELIA	LIBIA
METANO	CH ₄	92%	91,2%	86,5%
ETANO	C ₂ H ₆	3,5%	7,4%	12,4%
PROPANO	C ₃ H ₈	0,7%	0,8%	0,3%
BUTANO	C ₄ H ₁₀	0,3%	0,1%	—
OTROS		3,5%	0,5%	0,8%

[8]



El gas natural no tiene olor, color ni sabor, no es corrosivo ni tóxico y es poco reactivo, pero es inflamable⁹, por lo tanto se le agregan odorizantes (mercaptanos, sulfuros o disulfuros) para poder detectar fugas.

Forma mezclas inflamables con el aire pero sólo en concentraciones de entre el 5 y el 15%; no explota si no se encuentra confinado.

Su densidad respecto al aire es de 0.65.

El gas natural se quema limpiamente con aire produciendo casi exclusivamente CO₂, agua y algunas cantidades de óxidos de nitrógeno dependiendo de la temperatura de la combustión.

La calidad comercial del gas natural comúnmente se mide con dos escalas: la capacidad calorífica mayor y el índice Wobbe. La capacidad calorífica mayor se mide en BTU liberados al quemar un pie cúbico de gas siendo el valor normal de entre 950 y 1,200 BTU por pie cúbico. El índice Wobbe es la capacidad calorífica mayor dividida entre la raíz cuadrada de la gravedad específica del gas con un valor normal de entre 1,247 y 1,350. Su poder calorífico es de 1 millón de BTU por cada 28.3 m³, el valor mayor es de 10,032 kcal por m³ normal y el menor de 9,054 kcal por m³ normal. La capacidad calorífica del metano es de 25,360 BTU / lb. ^[11]

⁹ *Inflamable: del latín [inflamare], prender en flamas, forma correcta del erróneamente difundido anglicismo "flamable". Mismo forma que "Intoxicar".*

Tabla 10

Propiedades de los componentes principales

	Fórmula	Punto de ebullición (°C)	Peso específico a (Condiciones estándar)	Peso específico (agua=1)	Peso de 1 litro en kg	Potencia calorífica por pie cúbico (C.Est.) (BTU)	Potencia calorífica por unidad de carbono (BTU)
Metano	CH ₄	-160	0.554	-----	0.7159	1065	1065
Etano	C ₂ H ₆	-93	1.0494	-----	1.3567	1861	930.5
Propano	C ₃ H ₈	-45	1.5204	-----	1.9660	2645	881.667
Butano	C ₄ H ₁₀	+1	2.010	0.600 (103.3 Bè)	2.5940	3447	861.750
Pentano	C ₅ H ₁₂	36.4	-----	0.626 (93.6 >)	-----	4520	904
Hexano	C ₆ H ₁₄	68.9	-----	0.663 (81.2 >)	-----	5012	835.333
Heptano	C ₇ H ₁₆	98.4	-----	0.688 (75.5 >)	-----	-----	-----

[12]

El gas natural se maneja comúnmente en alguna de las siguientes formas:

- Gas natural, GN: gas a presión normal.
- Gas natural comprimido, GNC: gas a presión de 163.3 a 245 atmósferas (2400 a 3600 psi), se almacena en cilindros a presión.
- Gas natural licuado, GNL: líquido criogénico a -162 °C (-259 °F), se almacena en tanques aislados. El proceso de licuefacción elimina el oxígeno, el CO₂, los compuestos de azufre y el agua. Es entre 90 y 100% metano. Su densidad es de 0.43 veces la del agua. Un litro de GNL equivale a 618 litros de GN al ser llevado a condiciones estándar de presión y temperatura.
- Gas natural comprimido a partir del GN licuado, GNCL: mismas características que el gas natural comprimido, pero con más pureza.

Tabla 11

Propiedades del GNL (metano en más del 95%)

Formula:	CH ₄
Peso molecular:	16.04
Temperatura de ebullición (F):	-259
Densidad (lb / ft ³):	26.5
Temperatura de autoignición (°F):	1004
Limite inferior de inflamabilidad:	5%
Limite superior de inflamabilidad:	15%
Estequiometría aire / combustible:	17.2
Valor mínimo de calentamiento (BTU / lb):	22,980
Valor mínimo de calentamiento (BTU / gal):	81,700

[13]

Designación:

Se le designa gas natural porque sale junto con el aceite mineral en los terrenos petrolíferos; pertenece al grupo de los betúmenes naturales. Aunque también se considera como gas natural al que se encuentra en los filones de carbón, en las minas de oro y en las minas de sales potásicas, que no proceden de los betunes.

Hay dos tipos principales de gas natural por la forma en que se obtiene en su estado natural:

- Gas asociado con el petróleo crudo: en disolución o en fase gaseosa.
- Gas no asociado: húmedo (de fuentes que aunque carecen de crudo incluyen hidrocarburos licuables más pesados) o seco (proveniente de yacimientos que no contienen crudo).

El gas natural se procesa para eliminar el agua, los compuestos de azufre y los hidrocarburos pesados. El gas natural seco se manda del pozo a la tubería. El gas natural asociado y el húmedo se mandan del pozo a separadores donde se elimina el crudo por diferencia de presión, después se pasa a absorción donde se eliminan los hidrocarburos licuables quedando el gas seco que se manda a los



gasoductos. La composición del gas natural puede variar dependiendo de la tubería y del pozo.

2.2. En qué se utiliza y qué tan importante es

Usos tradicionales, Magnitud del consumo

El gas natural tiene una gran importancia como fuente de energía para una amplia gama de procesos que pueden ser tan sencillos como la calefacción; así como materia prima para la creación de productos.

El gas natural puede utilizarse directamente o después de extraerle los hidrocarburos licuables, como la gasolina; sus principales aplicaciones son la calefacción, el alumbrado y la producción de electricidad, la obtención de gasolina, la preparación del negro de humo, obtención de helio y de diversos productos químicos.

De todas estas posibles aplicaciones, la inmediata y más antigua del gas, tal como sale del terreno, es la calefacción, a la que siguió el empleo para el alumbrado.

De los aproximadamente 5,052.9 miles de millones de pies cúbicos diarios de GN seco consumidos en México en el año 2000 el 2.76% fue de uso doméstico, 26.9% fue de uso industrial, 21.25% para uso del sector eléctrico, 43.59% para PEMEX (autoconsumo) y 5.49% para PEMEX (materia prima).^[8]

En la industria el GN es usado como fuente de energía para todos los niveles de transformación; para manufacturar pulpa y papel, metales, químicos, piedra, arcilla, vidrio y para procesar ciertos alimentos. El gas también es usado para



tratar materiales de desperdicio, para incineración, secado, deshumidificación, calentamiento y enfriamiento, y cogeneración. En EUA⁶ los artículos de la Clean Air Act han hecho al GN una alternativa de energía altamente popular para la industria. En México también se sigue esta tendencia. En la actualidad un gran número de termoeléctricas se están convirtiendo al GN debido a los beneficios económicos y ambientales.

En cuanto a la fabricación de productos químicos, ante todo se ensayó la cloración del gas natural para preparar los diferentes hidrocarburos clorados. Se han hecho numerosas patentes relativas a la cloración del gas natural y del metano. En las regiones en que se puede tratar el gas natural con mayor proporción de etano e hidrocarburos más avanzados de la serie, se pueden preparar los correspondientes compuestos clorados y, por consiguiente, también los alcoholes.

En su papel de expansión como fuente de materiales al igual que de energía, el gas natural está proporcionando ahora muchos de los subproductos que alguna vez se obtuvieron del carbón y del petróleo. El metano, como principal componente del gas natural, cuando reacciona con el aire a diferentes temperaturas produce sustancias químicas de las cuales se obtienen objetos útiles, que varían desde tintes y detergentes a medicamentos y antisépticos. Otro componente del gas natural, el etano, se separa para producir el gas etileno. Este se usa para hacer artículos de plástico, zapatos, losetas y recubrimientos de azoteas.

El amoniaco es otro importante producto del gas natural. Con variantes del proceso conocido como "gas de síntesis", donde calentando el gas se separa el carbono en forma de CO dejando el hidrógeno, que mezclado con el nitrógeno del

⁶ *{Se usa muy repetidamente a los EUA como referencia porque ahí es donde se ha realizado una gran cantidad de trabajo sobre GN y su enfoque proambiental, tanto en instalaciones industriales como en vehículos.}*



aire forma el amoniaco. Esta materia prima proporciona una importante fuente para fibras sintéticas como el nylon, dacrón y orlón que han sustituido de alguna forma a la lana y el algodón. El amoniaco es también base para una amplia gama de fertilizantes.

La proteína que también puede hacerse del petróleo ahora se hace del GN. La compañía Imperial Chemical Industries –ICI– en Inglaterra estuvo al frente del desarrollo de alimento para animales de alto contenido de proteína a partir del metanol. También se han desarrollado levaduras especiales que crecen con rapidez en presencia del gas natural; cuando se cosechan y secan estas levaduras pueden ser utilizadas como un excelente sustituto del grano.

De hecho se está poniendo mucha atención al uso del GN en la agricultura. Los plaguicidas que son vitales en la prevención de enfermedades de las siembras, y los fertilizantes que aumentan su rendimiento, ahora son manufacturados en grandes cantidades a partir del gas natural.

No cabe duda de que el tratamiento del gas natural puede servir de base para la creación de una industria químico-sintética y que se pueden fabricar productos que den mayor beneficio que el que se obtiene dedicando al gas natural a la calefacción, el alumbrado o a la fabricación del negro de humo.

Además de las aplicaciones anteriores, actualmente la aplicación más prometedora del gas natural es en su forma líquida, ya que puede utilizarse como combustible alternativo en vehículos automotores; esto es de primordial importancia en estos tiempos en que se buscan opciones que disminuyan y en un futuro eliminen las emisiones que producen los vehículos y que contaminan la atmósfera.



El gas natural está encontrando nuevos usos no sólo como combustible vehicular sino como un componente de la tecnología de celda de combustible y también es a veces exportado como GNL o GNC. Muchas de estas tecnologías ofrecen interesantes nuevos caminos para el GN así como alternativas más eficientes y ambientalmente mejores en las que se considera su empleo como fuente preponderante para la obtención de electricidad.

EL GN puede ser una solución para la necesidad mundial de combustible líquido; conforme aumenta la dependencia de combustibles líquidos con el descenso correspondiente de la disponibilidad se deben buscar fuentes alternativas de energía, como es el caso del GNL.

El metano es un combustible ideal, fácil de transportar y poco costoso que puede ser usado para impulsar tanto vehículos de gasolina como máquinas diesel y turbinas.

Las ventajas del metano –GN– son:

Abundante. El Banco Mundial ha identificado más de 40 países con abundantes reservas de GN; además, existen fuentes renovables de metano en los campos y en los digestores anaerobios.

De bajo costo. El metano es independiente de los precios mundiales del petróleo, requiere poco proceso para su empleo y es abundante.

Combustible vehicular. El metano tiene un quemado limpio, elimina los hidrocarburos no quemados y las partículas dañinas del diesel; con 130 octanos el metano líquido es un combustible de quemado suave que reduce el mantenimiento y extiende la vida del motor.



2.3. Cómo se origina, produce, transporta y almacena

Historia de la formación del GN y su localización

Es una imagen conocida la de los quemadores de gas natural en los pozos petroleros en los que la energía se desperdicia en antorchas a cielo abierto y que tampoco es utilizada en los pozos de gas. Para 1970 el 10% del GN extraído se quemaba de esta forma. Se cree que mucho de este combustible perdido puede ser empleado económicamente a los precios actuales. Por ejemplo: en Vancouver, Canadá, un campo productor ventea aproximadamente 3.5 millones de pies cúbicos de metano diariamente ⁽¹⁹⁹³⁾. Si este gas fuera licuado a GNL reemplazaría 100 mil litros de diesel diarios, o 35 millones de litros al año. Esto podría proveer de combustible a 400 camiones o tractores de diesel y se pagaría por sí misma en unos pocos años.

Un pozo de gas al norte de la Columbia Británica, Canadá, ha estado cerrado por muchos años. Por varias razones no es económicamente viable conectar este pozo individual al sistema de tuberías. Pero el pozo tiene un tamaño tal que puede producir suficiente GNL para reemplazar 800 mil litros de diesel al año. Este combustible puede ser consumido por los granjeros locales en sus camiones, tractores y secadores.

Estos mismos números se aplican al gas venteado de las minas de carbón. Es común para un orificio ventear medio millón de pies cúbicos al día; una cantidad que podría ser convertida en aproximadamente 20 mil litros de GNL al día. ^[14]



Origen del GN

Desde hace millones de años la tierra y el mar se encuentran cubiertos de plantas y poblados por animales. Al morir, sus restos se van depositando en el fondo, siendo a su vez cubiertos por arena, lodo, piedra y otros sedimentos.

Estas capas de materia orgánica son comprimidas gradualmente en un proceso que toma miles de años, transformándose junto con la roca que les rodea resultando en gas y petróleo.

Con la evolución constante de la corteza terrestre, algunos de estos depósitos de gas y petróleo quedan confinados en capas de rocas impermeables que es donde son extraídos en el presente.

El gas y el petróleo de los que disponemos en la actualidad se cree que se formaron en el período *Carbonífero*^o cuando la tierra tuvo su más exuberante abundancia en vida vegetal y selvas pantanosas.

El origen del metano –gas natural– incluye varios procesos como la conversión de materia orgánica por microorganismos –biogénesis–, la descomposición térmica de materia orgánica enterrada –termogénesis–, y procesos de corteza profunda –abiogénesis–. El metano boyante migra elevándose a través de los poros y fracturas de la roca y se acumula bajo capas impermeables de donde es extraído en la actualidad o eventualmente alcanza la superficie y se disipa en la atmósfera.

* (*Carbonífero*^o): Período geológico perteneciente a la era Paleozoica o primaria superior.)



El metano biogénico resulta de la descomposición de materia orgánica por metanógenos, que son microorganismos productores de metano los cuales se encuentran cerca de la superficie de la corteza terrestre en regiones carentes de oxígeno donde las temperaturas no exceden los 97 °C (o 207 °F). Los metanógenos también viven dentro del intestino de muchos animales, incluyendo las personas, y en el sistema digestivo de rumiantes como vacas y ovejas, donde ayudan a la digestión de la materia vegetal. A causa de que el metano generado en el subsuelo es menos denso que el aire en las rocas en las que es producido se difunde lentamente ascendiendo a través de pequeñas fracturas y poros interconectados; y puede eventualmente alcanzar la superficie de la tierra y disiparse en la atmósfera. Hay lugares donde, sin embargo, la difusión del metano es impedida por capas de roca impermeable y el gas puede ser atrapado en estructuras. Si se acumula suficiente gas bajo estas capas impermeables las estructuras pueden ser perforadas y el gas ser extraído para su uso como fuente de energía.

El metano termogénico es creado en forma similar al petróleo. Al ser depositadas las partículas orgánicas en el lodo con otros sedimentos y ser profundamente enterrados y comprimidos, las altas temperaturas causan que los enlaces del carbono en los compuestos orgánicos se rompan y formen petróleo con menores cantidades de gas. A temperaturas mayores, causadas por el incremento de la profundidad de enterramiento, el metano se vuelve el producto dominante hasta que eventualmente reemplaza a todo el petróleo. La formación simultánea del petróleo y el gas en las etapas tempranas del proceso de descomposición térmica es la razón principal para la asociación de petróleo y gas en las acumulaciones presentes en los dos o tres km superiores en la corteza terrestre. En partes profundas de las cuencas posiblemente el metano sea el único hidrocarburo formado.



A mayores profundidades subterráneas el metamorfismo puede sacar todos los átomos de hidrógeno de los compuestos orgánicos y dejar un residuo de carbón, comúnmente en la forma de grafito. Bajo ciertas condiciones en la corteza profunda el grafito puede reaccionar con agua, esta reacción resulta en la recombinación de carbono e hidrógeno a metano. Estudios recientes en sistemas *quartzvein* ^[15] indican la presencia de grandes flujos de gases y fluidos en la corteza profunda, el volumen de metano transportado puede ser tan grande como de 50 a 500 miles de millones de pies cúbicos para un solo sistema de vena gigante.

El metano abiogénico es formado por otro proceso que involucra el carbón no orgánico y gases ricos en hidrógeno que existen profundamente en la tierra. Esta formación es similar a la de los gases primordiales que se filtraban del interior de nuestro planeta o a la de los gases liberados de las rocas de la corteza durante el metamorfismo. Conforme estos gases migran ascendiendo e interactuando con minerales de la corteza reaccionan para formar elementos y compuestos presentes en la atmósfera (nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, carbón y agua). En regiones volcánicas actualmente hay una continua expulsión de gases de dióxido de carbono y agua que son originados profundamente en la tierra. Si estos mismos gases migraran a través de las rocas a altas presiones en la ausencia de oxígeno el metano sería el compuesto estable dominante. Similar al proceso de obtención del gas de síntesis.

Tal vez el metano se está formando aun en estas profundidades bajo las grandes regiones continentales de la tierra donde prevalecen la alta presión y las bajas condiciones de oxígeno.

Tabla 12

Origen del metano y su proceso

Origen	Proceso
Biogénico	Formado naturalmente por metanógenos presentes en los residuos orgánicos.
Termogénico	Formado a partir de condiciones especiales de temperatura y presión en la corteza terrestre con materia orgánica.
Abiogénico	Formado partiendo de materia no orgánica en reacción química con las sustancias presentes en la corteza profunda.

Reseña del uso del GN

Mucho tiempo se consideró al gas natural como un subproducto estorbo cuando salía junto con el petróleo de los pozos, hasta que finalmente se le concedió valor no sólo como agente de calefacción sino también como vehículo de hidrocarburos ligeros, entre otros usos.

Anteriormente este gas se dejaba perder en la atmósfera, hoy en día en pro de la explotación racional y con la presión de disposiciones oficiales, el gas se capta y se separa en sus productos de condensación, como la gasolina del gas natural, ya sea en la misma mina o en grandes fábricas.

El gas natural existe en abundancia en muchas regiones del mundo: Comunidad de Estados Independientes –CEI, antes Unión Soviética–, Medio Oriente, Africa y Europa Oriental entre otros.

Las reservas mundiales de gas natural están difundidas desigualmente, los productores más grandes, EUA y la CEI son también grandes consumidores; EUA es el primer consumidor mundial por lo que importa de Canadá y México entre otros países.



Se sabe que los EUA poseen grandes reservas, pero el gas está atrapado en esquistos y no ha sido posible extraer este gas. También se sabe que la ex Unión Soviética tiene enormes reservas, pero es difícil calcular las cantidades exactas.

La gasificación de las fuentes de carbón ha sido probada con éxito en Francia y ya está en uso en la ex Unión Soviética. Se practican horadaciones verticales subterráneas y se encienden las vetas. Los gases resultantes se envían a la superficie para su tratamiento, el cual proporciona un elevado rendimiento de gas.

El metano también puede producirse de varias fuentes. El alga gigante, como una forma de alga marina de crecimiento rápido, puede cosecharse en el mar, ser llevada a tierra y procesarse para producir metano. En condiciones adecuadas de cultivo, esta biomasa marina podría convertirse en una gran fuente de gas metano, una de tales plantas piloto ya está en operación frente a las costas de California, EUA.

En tierra es posible obtener metano de hierbas, plantas y residuos de cosechas, pero esta biomasa terrestre puede tener muchos otros usos. El cultivo de plantas en el mar, más que en tierra, parece tener más potencial como fuente futura de metano.

Procesando estiércol también es posible descomponer la materia orgánica en metano y otros materiales. Esto ha sido aplicado en especial en el lejano oriente a las modernas granjas de cerdos y aves. En una mayor escala se está usando para procesar las aguas negras de las ciudades obteniendo metano de baja graduación.



Quizá la fuente futura más interesante podría ser el metano abiogénico. Si en realidad existe este tipo de gas, y se encuentra la forma de llevarlo a la superficie, las cantidades recuperables "podrían ser enormes".^[16]

Transporte y almacenamiento

Una vez extraído, el gas natural es distribuido por todo el mundo a través de gasoductos pudiendo éstos pasar incluso a través del mar; estos sistemas de tuberías son los responsables de entregar el gas natural, a condiciones normales o comprimido, y pueden también contener, además del metano, hidrocarburos como el etano y el propano, y otros gases como son nitrógeno, helio, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y vapor de agua. Todo esto de acuerdo a la composición del pozo del que se extrae.

La distribución y el transporte del gas natural desde los yacimientos hasta los puntos de consumo se realiza de dos formas:

1. Mediante canalización de gas (Gasoductos)
2. Mediante su transporte y almacenamiento en estado líquido.

La distribución del gas natural en estado gaseoso por tuberías se realiza a diferentes presiones.

Alta presión B: Presiones mayores de 16 Bares.

Alta presión A: Presiones comprendidas entre 4 y 16 Bares.

Media presión B: Presiones comprendidas entre 0,4 y 4 Bares.

Media presión A: Presiones comprendidas entre 0,05 y 0,4 Bares.

Baja presión: Presiones inferiores a 0,05 Bar.



Tabla 13

Denominación de la presión en tuberías en función de su magnitud

Presión	Baja	Media A	Media B	Alta A	Alta B
Monto (Bar)	Menor a 0.05	De 0.05 a 0.4	De 0.4 a 4.0	De 4 a 16	Mayor a 16

[17]

Entre los diferentes tipos de gas natural, el gas natural comprimido (GNC) se comprime y almacena en tanques especiales a presiones superiores a 3600 psig. Usualmente tiene la misma composición que la tubería de gas de donde se obtiene aunque con algo menos de agua. —eliminada en el proceso de compresión—.

En determinados casos para facilitar su transporte y almacenamiento el gas natural se licúa formando el GNL aumentando en este proceso su densidad aproximadamente 625 veces.

Para licuar el gas, este debe ser enfriado a $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ a presión atmosférica. Muchas sustancias se solidifican o congelan a estas temperaturas criogénicas, (debajo de los $-152\text{ }^{\circ}\text{C}$), por lo que el gas natural debe ser purificado antes de ser licuado; el mismo proceso de licuefacción se emplea para realizar la purificación, ya que al ir disminuyendo la temperatura muchos de los contaminantes cambian a su estado líquido o sólido y pueden ser retirados con facilidad. Se puede así separar también el GN del nitrógeno ya que a la temperatura de licuefacción del GN, el nitrógeno aún permanece gaseoso.

Se han desarrollado muchos métodos diferentes para enfriar el gas natural a temperaturas criogénicas para producir el GNL. Los dos métodos principales son: 1) el ciclo en cascada y 2) el ciclo de expansión.



El ciclo de cascada transfiere el calor del GN a refrigerantes con puntos de ebullición más bajos; el ciclo de expansión utiliza el efecto de enfriamiento obtenido de la expansión del caudal de un gas comprimido a través de una turbina o motor para extraer el calor bajo el Efecto Joule-Thompson.

El gas natural es licuado en grandes cantidades alrededor del mundo, principalmente para facilitar el transporte marítimo del gas desde los mantos naturales hasta el mercado. La gran mayoría de GNL es vuelto a vaporizar para utilizarlo como combustible en el calentamiento.

El gas natural doméstico es licuado por dos razones principales:

- 1) para ser almacenado por los distribuidores para utilizarlo durante periodos en que la demanda exceda la oferta existente, –este es el caso de los inviernos muy fríos–, en el que la demanda se incrementa rápidamente, y
- 2) para remover el nitrógeno del gas natural. –El N_2 condensa a $-195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ por lo que permanece gaseoso.–

Las compañías transportistas están acostumbradas a almacenar y manejar diesel y gasolina, pero aunque el GNL es considerado más seguro que estos combustibles, presenta diferentes riesgos.

El manejo y almacenamiento de líquidos criogénicos por debajo de $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-240\text{ }^{\circ}\text{F}$), requiere de equipo especializado y procedimientos con los que los transportistas están poco familiarizados. El entrenamiento y el soporte técnico que se da a los empleados del transporte requiere que se enfatice en un desempeño y medidas de seguridad óptimas.



Aunque el GNL se ha producido en abundancia por lo menos durante 75 años y utilizado en la transportación por más de 30 años, el número de personal técnico especializado en el ramo, es relativamente limitado.

Los tanques de GNL son siempre de una construcción de doble pared con un aislamiento extremadamente eficiente entre ellas, los tanques grandes tienen una relación de altura por anchura baja, y son diseñados como cilindros con techo en forma de domo. Las presiones de almacenamiento en estos tanques son muy bajas, menos de cinco psig. Pequeñas cantidades, de 70 mil galones y menos son almacenadas en vasijas a presión enchaquetadas al vacío, horizontales o verticales. Estos tanques pueden estar a cualquier presión de entre menos de 5 psig a arriba de 250 psig. El GNL debe ser mantenido frío, por lo menos debajo de $-83\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-117\text{ }^{\circ}\text{F}$) para mantenerlo líquido independientemente de la presión.

El aislamiento, tan eficiente como es, no puede mantener la temperatura del GNL fría por sí misma. El GNL es almacenado como un criogénico en ebullición esto es, es un líquido muy frío en su punto de ebullición. La temperatura de ebullición del GN no cambia incluso cuando se incrementa el calor, este se mantiene frío por la evaporación. De esta forma, el GNL se mantendrá a una temperatura constante cercana si se mantiene la presión constante. Este fenómeno es llamado auto refrigeración. Conforme el vapor (que proviene de la ebullición del GNL) deja el tanque, la temperatura permanecerá constante.

Si el vapor no es drenado entonces la presión y la temperatura dentro del recipiente se elevarán. Sin embargo, aún a 100 psig la temperatura del GNL aún estará cerca de los $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El GN se transporta por medio de conductos debido a su economía y seguridad ya que para poder transportarlo por medio de cilindros estos tendrían que tener



especificaciones especiales, lo que implicaría costos de infraestructura; para poder envasarlos tendría que licuarse; y en cuanto a su distribución, esta sería por medio de camiones lo que implicaría emisión de contaminantes, más el deterioro de las calles y avenidas. Hay casos excepcionales como la ZMCM donde por falta de tubería instalada podría en dado caso ser más conveniente económica y ambientalmente la transportación terrestre.

Grandes cantidades de gas natural son almacenadas además de líquido, como gas en grandes cavernas de sal y en pozos agotados cercanos al lugar de disposición final. Los mismos sistemas de tuberías se emplean en ocasiones para almacenar el gas natural.

2.4. Ventajas del gas natural.

2.4.1. Ventajas Ambientales.

El GN posee muchas ventajas como combustible sobre el carbón y el petróleo para aplicaciones industriales y sobre la gasolina y el diesel como combustible para vehículos, gran parte de éstas relacionadas a beneficios ambientales.

El gas natural es el combustible fósil de más limpio quemado, por esto puede ayudar a mejorar la calidad ambiental del aire y el agua, especialmente cuando se usa en lugar de otras fuentes de energía más contaminantes. De la combustión del gas natural no resulta virtualmente ninguna emisión atmosférica de SO_2 , ni partículas de materia, y disminuye las emisiones de CO, hidrocarburos, NO_x y bióxido de carbono comparado con la combustión de otros productos fósiles. El gas natural es más atractivo ambientalmente que otros combustibles fósiles porque está compuesto principalmente de metano; cuando este se quema



completamente los principales productos de combustión son el CO_2 y el vapor de agua. En comparación el petróleo y el carbón tienen estructuras moleculares mucho más complicadas. Estas incluyen una mayor relación de carbono a hidrógeno, así como varios compuestos de azufre y nitrógeno, los cuales no se queman tan limpiamente. La combustión del carbón y petróleo como combustibles industriales también produce partículas de ceniza que no se queman en lo absoluto, sin embargo, pueden ser arrastradas a la atmósfera.

Ya que el gas natural arde limpiamente es que puede ser una forma efectiva de controlar la contaminación del aire en aspectos específicos tales como la lluvia ácida, el ozono a nivel de suelo, el daño a la capa de ozono y los gases de efecto invernadero. Reducir los altos niveles de contaminación por ozono en áreas urbanas requiere la reducción en emisión de hidrocarburos y de NO_x . Además de ser un contribuyente en la formación de ozono el CO es un peligro significativo para la salud por sí mismo.

El debate y las medidas contra la lluvia ácida se han enfocado en reducir el dióxido de azufre y las emisiones de NO_x . De todo el GN consumido en EUA el 49% ^[18] es usado en el sector industrial, en México esta cifra representa el 27% ^[8]. Aunque el GN puede ser más caro de comprar que el carbón, puede ayudar a los usuarios industriales a ahorrar en costos de operación porque el equipo de GN es menos complejo y más fácil de mantener y operar que otros equipos; como además el GN es distribuido en tuberías subterráneas no hay necesidad de almacenarlo en el sitio y existe una gran variedad de contratos con los proveedores para asegurar el abasto, además no deja residuos sólidos ni cenizas. El GN puede hacer una contribución inmediata ayudando a resolver estos problemas de contaminación. Por ejemplo es posible quemar gas natural alternativo simultáneamente con combustibles menos atractivos ambientalmente. Este uso selectivo del gas natural con otros combustibles puede reducir



significativamente la contaminación del aire de fábricas y de plantas generadoras de electricidad. Estas opciones requieren un tiempo mínimo de instalación y una inversión relativamente baja de capital y otorga flexibilidad en el cumplimiento de los estándares ambientales.

Como un ejemplo se puede mencionar que en un estudio reciente de un futuro energético alternativo se dice que el rápido desarrollo de nuevas tecnologías podría resultar en la estabilización del consumo total de energía en EUA dentro de los siguientes 20 años con la privilegiada posición correspondiente de los combustibles con mucho carbono frente al gas natural, energías renovables y equipos de alta eficiencia. Este estudio crucial patrocinado por la Alianza para Ahorrar Energía, la Asociación de Industrias de Energía Solar y la Asociación de Gas Americano, de EUA dice que en un escenario podría resultar una reducción del 12% en las emisiones de CO₂ de 1990 a 2010 ^[19], en menores cuentas de consumo de energía, en un balance mejorado de comercio y en un mayor empleo en las industrias de energía doméstica. Estos resultados con las debidas reservas pueden ser aplicados a México.

Los contaminantes como el SO₂ que provocan la lluvia ácida no son un problema localizado, viajan cientos de kilómetros en la atmósfera y los depósitos ácidos caen frecuentemente lejos de su fuente. Se calcula que 23 millones de toneladas de SO₂ son emitidas anualmente en EUA de acuerdo a la EPA. Las instalaciones de las plantas productoras de electricidad contribuyen con cerca del 70% de todas las emisiones de SO₂ en ese país ^[19]. Las plantas alimentadas por carbón, eléctricas e industriales, contribuyen con el 90% de las emisiones de SO₂ en fuentes estacionarias de combustión. Para el caso de la ZMCM, de acuerdo a datos oficiales, se considera que el SO₂ ya no es un problema prioritario debido a que se supone que las industrias que lo producían han sido reubicadas o han



cambiado su fuente de energía. El empleo de gas natural disminuye este problema.

La combustión de gas natural habitualmente no produce CO y genera pocos NOx. Un quemador operando con gas natural emite en promedio sólo 0.0006 libras de SO₂ por millón de BTU de combustible quemado.

Otros combustibles, en contraste, emiten más de 6 libras de SO₂ por MBTU {6 / 0.0006} 10,000 veces más dióxido de azufre. Los artículos de la Clean Air Act de 1990 en EUA exigen a las plantas reducir sus emisiones de SO₂ en 10 millones de toneladas anuales y las de NOx en 2 millones. También imponen una capacidad absoluta de 8.9 millones de toneladas de emisiones de SO₂ en las instalaciones del sector eléctrico después del año 2000 ^[19].

A partir de estos datos se puede esperar un gran crecimiento en el consumo de gas natural, no sólo en EUA sino en todos los países que sigan la misma tendencia pro ambiental.

Ventajas del gas natural relativas al calentamiento global: Algunos científicos piensan que la tierra se está volviendo ligeramente más caliente a causa de los gases de combustión y otros desechos que están siendo emitidos en la atmósfera y que atrapan el calor del sol cerca de la tierra.

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático, –IPCC– de EUA, concluye que la temperatura global promedio se ha incrementado entre 0.03 y 0.06 Celsius en los últimos 100 años ^[19]. También consideran que las emisiones de las actividades humanas son una parte importante de la causa de este incremento.



Se piensa que los gases principales del efecto invernadero causantes del calentamiento global son: CO₂, metano, clorofluorocarbonos y óxidos de nitrógeno.^o De acuerdo con el IPCC el CO₂ es responsable de la mitad del calor atrapado. El 45% del calor atrapado entre 1980 a 1990 fue atribuible a la producción y uso de energía.

Aunque el metano ha sido identificado como un posible contribuyente secundario al cambio climático global, sus emisiones significativamente menores le han evitado el tener un impacto relevante en el medio ambiente. El IPCC estima que toda la industria del gas natural es responsable solamente por el 2 o 3% del total de las emisiones de metano hechas por el hombre ^[19]. Aunque esta contribución es pequeña la industria del gas natural se encuentra trabajando con la EPA de EUA, para reducir voluntariamente aún más las emisiones de metano de las operaciones industriales.

El quemado de combustibles fósiles contribuye entre un 75 y 80% en las emisiones de CO₂ y del 20 al 30 % de las emisiones de metano a la atmósfera. El gas natural cuando se quema reduce las emisiones de CO₂ en más del 45% sobre las de otros combustibles. —45% menos que el carbón y 30% menos que el petróleo en la base energética equivalente—. Cuando son empleadas técnicas de quemado de alta eficiencia la reducción de las emisiones de CO₂ es cerca del 70%. Un hogar nuevo con GN produce hasta 60 % menos que uno totalmente eléctrico ^[18]. —Considerando el ciclo completo de energía—.

El quemado de gas en ciclo combinado de generación y cogeneración involucran quemar gas con otro combustible para lo cual se emplea menos de este combustible que con métodos antiguos y se reduce el desperdicio de calor, tomando ventajas de la energía calorífica en varios puntos antes de su liberación.

^o {De los que ya se mencionó la menor producción con el uso del gas natural}



La tecnología del ciclo combinado es usada principalmente para la producción de electricidad donde la cogeneración es empleada en una variedad de aplicaciones, incluida la producción de calor o vapor. El requemado de GN involucra la inyección de GN en un quemador tradicional de combustible arriba del punto donde se quema el combustible tradicional. El gas es quemado incrementando el monto de energía producida pero reduciendo la cantidad de NOx y SO₂ que el quemador emite. La tecnología de requemado puede reducir las emisiones de NOx en 70% y de SO₂ al 25% ^[19]. El coquemado de GN se refiere a la inyección de este en el quemador primario de combustible tradicional para luego requemarlo. Esto también reduce las emisiones de NOx y SO₂ sin requerir cambios mayores en el tipo de instalación o grandes incrementos en el costo para los productores de energía.

Recientemente la tecnología de celda de combustible ha sido una de las más prometedoras opciones ambientales en cuanto a tecnología de gas natural. Estas celdas fueron usadas primero por la NASA en los años sesenta para la generación de energía en cápsulas espaciales. El alto precio de la tecnología de celda de combustible ha limitado el incremento en su implementación, pero ahora las celdas están siendo usada para generar energía en hospitales, y próximamente, los vehículos podrán usar esta tecnología. Las celdas de combustible se basan en la interacción química entre el gas natural y ciertos metales como el platino, el oro y otros electrolitos para producir electricidad, donde el único producto de la operación de estas celdas de combustible es agua que es suficientemente pura como para beberse y CO₂. Se supone que para el año 2004 los principales fabricantes automotores venderán comercialmente los vehículos de celda de combustible.



2.4.2. Ventajas en seguridad.

El GN posee no sólo ventajas ambientales sino también ventajas en seguridad entre las que destacan:

El GN no es ni corrosivo ni tóxico, no contamina el suelo o el agua, tiene un rango de inflamabilidad muy limitado, en concentraciones en el aire abajo del 5% y por arriba de aproximadamente el 15% no se inflamará. La temperatura de ignición del GN es de arriba de 649 °C, comparada con los cerca de los 324 °C para la gasolina. Los tanques de GN están hechos de acero, aluminio y materiales compuestos, y son mucho más fuertes que los tanques de gasolina. Además, la temperatura de ignición alta y el rango de inflamabilidad limitado reducen la posibilidad de un incendio o explosión accidental, siendo por esto un combustible inherentemente seguro al ser comparado con otros. El GN es más ligero que el aire, por esto siempre se elevará hacia la atmósfera y al exterior no como otros combustibles que son más pesados que el aire y se pueden estancar como un líquido o un vapor sobre el suelo.

Algunas tuberías, sobre todo las que no tengan cierta flexibilidad, podrían fracturarse, sin embargo, cerrando las válvulas y el suministro de gas, pueden iniciarse las labores de reparación y rescate casi inmediatamente debido a que, al ser más ligero que el aire se disipa rápidamente en la atmósfera. Estas fugas se pueden detectar fácilmente debido a la caída de presión en las tuberías.

El gas natural no tiene un olor propio, debido a esto es que se agregan odorantes químicos (mercaptanos, sulfuros o disulfuros) que permiten detectar el GN en caso de fuga al 0.5 % de concentración en el aire, muy por debajo de los niveles que pueden causar malestares por inhalación y de la concentración que permite la combustión.



2.4.3. Ventajas Económicas.

El GN presenta además de grandes ventajas ambientales y en seguridad beneficios económicos que no son despreciables.

Al ser de quemado mas limpio requiere un menor mantenimiento de los equipos; al ser más estricto su control para mantener la seguridad se tiene también un mayor control cuantitativo de su consumo y, en el caso del GN como combustible vehicular, impide su extracción por lo que se puede llevar un mejor control en cuanto al suministro.

Tabla 14
Ventajas del gas natural

Ambientales	Es el combustible fósil de más limpio quemado: No emite partículas de materia, minimiza las emisiones de monóxido de carbono y de óxidos de azufre y disminuye sensiblemente el bióxido de carbono y los óxidos de nitrógeno liberados.
Seguridad	No es tóxico ni corrosivo, posee un rango de inflamabilidad limitado y es más ligero que el aire. Por el tamaño de su molécula se disipa rápidamente. En caso de fuga es detectable mucho antes de que su concentración forme una mezcla inflamable con el aire.
Económicas	Es más económico por volumen equivalente (capacidad energética), reduce el mantenimiento de los motores y los equipos, no se puede extraer sin el equipo apropiado, especialmente en vehiculos, evitando pérdidas por trasvase de combustible. Es susceptible de producción por lo que se puede considerar renovable



☺ 3. El gas natural como combustible vehicular

3.1. Relevancia del GN como combustible vehicular

Estudios realizados por varios países señalan que una de las fuentes principales de la contaminación son los gases de combustión de los vehículos. Se estima que más del 50 % de la contaminación atmosférica es atribuible a la transportación; esta cifra asciende a más del 75% en las ciudades. En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se piensa que esta cifra alcanza el 85 %.

El nivel de contaminación por los vehículos es influido por diversas variables, entre las que destacan:

- La calidad de los combustibles
- Las condiciones mecánicas del vehículo
- La magnitud del parque vehicular y su antigüedad
- La velocidad promedio del desplazamiento de vehículos en las calles
- Las características geográficas y topográficas de las ciudades



De las variables anteriores, la geografía y la topografía de las ciudades no son modificables, las otras variables restantes si lo son. Por ejemplo, el promedio de antigüedad de los vehículos es de 9 años; en teoría, este es un parámetro sujeto a modificación.

Se ha procurado el mejoramiento en la calidad de los combustibles tradicionales por encima del uso de otros alternos más limpios, se ha intentado también la aplicación de programas para contingencias ambientales –como el “Hoy no circula”– porque son más factibles de realizarse a corto plazo, pero a mediano y largo plazo es preferible el empleo de alternativas eficaces en combustibles aunque esto requiera modificaciones a los vehículos, crear infraestructura para su abastecimiento y desarrollar la cultura en la sociedad para su utilización. Para el logro de lo anterior son necesarios recursos económicos cuantiosos, compromisos de la sociedad y, principalmente, fuertes apoyos gubernamentales para su desarrollo.

Algunas de las limitaciones de programas como el “Hoy no circula” y sus severos inconvenientes, son explicados en el siguiente texto:

“Contrariamente a lo buscado por algunas políticas del DDF y otras dependencias respecto a la proliferación del uso de vehículos particulares, la industria automotriz se enorgullece del incremento de sus ventas. En febrero pasado anunció récord histórico del 16.8% logrado en 1991 en relación a 1990. No se indicaron cifras específicas para el Área Metropolitana de la Ciudad de México, pero se estima que de las 681,981 unidades nuevas, la mitad se vendieron en esta ciudad; es decir, alrededor de 340, 000 unidades anuales se incorporaron a la vialidad citadina y área conurbada. Haciendo un cálculo conservador de 200,000 nuevas unidades para 1989 y 280,000 para 1990, podríamos concluir (a reserva de comprobarlo con datos más confiables) que desde que se aplicó por primera vez



el programa "Hoy no circula" se incorporaron alrededor de 820,000 unidades más; casi la misma cantidad de vehículos que paraliza actualmente dicho programa aplicado dos días, lo cual podría indicarnos su actual limitación.

El uso creciente del automóvil tiene su efecto correlativo en la contaminación: el 95% de los vehículos se emplea para usos privados o individuales, transporta el 19% de los viajes por persona y por día, ocupa el 70% de la vialidad y consume 15 veces más combustible por persona que el sistema colectivo." [20]

En los capítulos anteriores quedó ya planteado el problema referente a la contaminación y sus efectos adversos, así como la magnitud en los costos que produce; la conveniencia del empleo del gas natural por sus características de eficiencia energética, menores costos totales y cualidades proambientales, en seguridad y económicas; y, las características y propiedades que hacen del gas natural una fuente de energía en extremo conveniente para su empleo industrial. Queda por ahondar lo referente a las cualidades del GN específicamente como combustible para vehículos.

3.2. Comparación de propiedades físicas del GN con otros combustibles vehiculares.

3.2.1. Combustibles vehiculares

Los combustibles empleados para transportación deben cumplir con ciertos requerimientos como son la alta densidad energética –para no aumentar en exceso el volumen–, la economía, la característica proambiental de sus emisiones de combustión y la seguridad en su manejo, entre otros.



Aunque muchos combustibles son reconocidos como una alternativa potencial para la gasolina y el diesel, tales como el metanol, mezclas de metanol gasolina, el gas natural, el gas licuado de petróleo –GLP–, el etanol, el hidrógeno –H₂–, la electricidad en acumuladores y de celdas de combustible, amoniaco, aceites vegetales o el dimetil éter; de todos estos el GN ofrece el menor costo y las menores emisiones.

3.2.2. Propiedades físicas del GN como combustible vehicular

Los motores de vehículos que trabajan con gas natural son más limpios que los motores convencionales que trabajan con combustibles a base de hidrocarburos mas pesados, primordialmente porque el gas natural tiene un mayor grado de octanaje y una velocidad de ignición baja debido a su velocidad de flama baja. Estos motores muestran consistentemente menores emisiones de HC, CO y partículas de materia que otros motores con combustibles fósiles más pesados. Un documento guía de la EPA en EUA escrito a inicios de 1988 establece que los vehículos a GN desde el punto de vista conservador reducen las emisiones de HC en 40% y de CO en 50%. Con tecnologías más actuales de conversión a GN es posible alcanzar reducciones del 87% en HC y 82% en CO ^[1].

Los vehículos a gas construidos y optimizados en la fábrica han alcanzado la reducción del 90% de HC y de CO con reducciones del 30% en NO_x y sin casi ninguna partícula.

Reducciones significativas son también posibles en la conversión de vehículos viejos.

La conversión de motores viejos impulsados por gasolina o diesel a gas natural reducirán el CO, los HC y los NO_x. Esto es particularmente cierto para camiones a



diesel, algunos autobuses y coches viejos que contribuyen con entre el 60% y el 90% de la contaminación total vehicular.

El metano puro, como componente principal del gas natural, tiene un octanaje de 130, más alto que cualquiera de los combustibles comunes. Por esto el gas natural puede ser comprimido en un cilindro de combustión –pistón– a casi el doble de la presión que la gasolina, con poco riesgo de golpeteo de preignición. Esto permite que los motores de GN sean diseñados para usar el combustible más eficientemente, con tecnología "lean burn". La tecnología "Lean Burn", o quemado pobre, implica la combustión del gas natural con una ligera deficiencia de combustible de acuerdo a la relación estequiométrica en la mezcla con el aire; se puede considerar también como un ligero exceso de oxígeno en la mezcla combustible. El llevar a cabo la reacción con una relación no estequiométrica de metano - oxígeno permite desplazar el equilibrio químico de los productos para disminuir la concentración de combustible no quemado y especies parcialmente oxidadas, como el monóxido de carbono; ya que el exceso de oxígeno tiende a incrementar la concentración de óxidos de nitrógeno, generalmente se hace necesario aumentar un convertidor catalítico al sistema para evitar este inconveniente.

Lo anterior redundaría en que los motores de gas natural sean diseñados para utilizar una tecnología más eficiente en el aprovechamiento del combustible. Así se pierde menos combustible crudo a través del sistema de escape, que es la mayor fuente de contaminación de hidrocarburos. El gas natural tiene una reactividad fotoquímica extremadamente baja, cero emisiones evaporativas y emisiones reducidas en arranque en frío y calentamiento. Los motores a gas natural también generan significativamente menos azufre, y casi nada de partículas de materia.



Muchas barreras económicas han evitado la conversión de motores convencionales a gas natural. Sin embargo, la relación económica primaria considerando el ciclo completo de energía, esto es, el costo de producir energía con un litro de diesel o gasolina comparado con el costo de producir una cantidad equivalente de energía de gas natural está a favor de este último.

- El gas natural, comprimido o licuado, es el más limpio en combustión de todos los combustibles alternos.
- El gas natural es más barato que cualquier otro combustible viable en base a energía entregada equivalente.
- El gas natural es seguro como combustible vehicular, tanto, que se considera más seguro que la gasolina y el diesel. A diferencia de otros, el gas natural es más ligero que el aire y por lo tanto se dispersa rápidamente cuando se descarga. El gas natural también requiere de una concentración mayor y una temperatura más alta que la gasolina para inflamarse (gas natural 640 °C vs. gasolina 320 °C) lo que reduce un riesgo potencial.⁸
- Los motores a gas natural, son típicamente más silenciosos que los motores a gasolina o diesel.
- Los motores que usan gas natural requieren menor mantenimiento de lubricación que los de gasolina y diesel debido a la pequeña cantidad de emisiones de partículas.

El GN en su estado natural tiene dos factores limitantes que le impiden ser identificado como una opción de combustible limpio alternativo.

- La primera es la baja densidad del gas natural: para cargar una cantidad equivalente de combustible, un tanque de almacenamiento de GN necesita

⁸ (El riesgo se entiende definido en una de sus formas más actuales como el resultado del producto de la probabilidad de la ocurrencia indeseada por la magnitud de sus consecuencias. $R = P \times M$)



aproximadamente cuatro veces el tamaño y peso de un tanque para almacenar gasolina o diesel, la mayor ventaja de la gasolina y el diesel es su relativamente alto punto de ebullición; ambos combustibles son líquidos a temperatura ambiente, lo que les permite una mayor facilidad en el transporte del combustible.

- Segundo, el gas natural es una mezcla heterogénea de gases hidrocarburos naturales. La composición de estos puede variar enormemente de una reserva a otra. Los motores de combustión requieren una mezcla consistente de combustible para trabajar bien con un mínimo de emisiones.

La principal desventaja del gas natural es su baja densidad, ya que debe ser almacenado como gas comprimido de 3,000 a 3,600 psi (204 a 245 atmósferas), o bien como líquido criogénico a $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si se almacena como gas natural comprimido (GNC), los tanques de almacenamiento que se requieren, ocupan aproximadamente 4.3 veces más espacio y 3.5 veces más el peso ^[12] que los tanques de diesel para acarrear cantidades equivalentes en energía.

El gas natural licuado (GNL) atenúa las limitaciones de densidad y composición. Es, como su nombre lo dice, un líquido y, por tanto, es más denso que el gas natural comprimido (GNC). También puede hacerse más homogéneo por lo que el gas natural licuado es más benéfico para los vehículos; sin embargo, se deben cubrir condiciones especiales en el diseño del tanque para adecuarlo a las temperaturas criogénicas.

Así como todas las alternativas de combustibles, el GN debe cumplir con los reglamentos estatales y federales aplicables para vehículos y sus emisiones; los vehículos a gas natural requieren de modificaciones que cuestan aproximadamente de 5% a 10% más del costo original del vehículo ^[12], sin



embargo, la recuperación en base al ahorro en combustible por usar gas natural en lugar de gasolina, toma –de acuerdo a la experiencia internacional– de 3 a 4 años para vehículos a gasolina y es más rápida para vehículos de alto consumo de diesel.

Ya que el costo de otros combustibles alternos es más alto que el de la gasolina y el diesel, es cuestionable si habrá recuperación económica de la inversión alguna vez.

También se requiere de una inversión importante para construir las estaciones de abastecimiento de gas natural, que puedan llenar los tanques de 5 a 7 minutos – en el caso del GNL–.

El costo de conversión a GN dual, esto es, el costo de convertir un vehículo a gas natural de combustible dual, gas natural/gasolina o gas natural/diesel, generalmente es también de entre el 5% y el 10% ^[12] del costo original del vehículo.

Se estima que cuando se realice la fabricación masiva de vehículos dedicados a GN, los fabricantes serán capaces de proporcionar vehículos alimentados con GN por un costo adicional –en EUA– de 200 ^[12] dólares sobre el costo del valor de un vehículo alimentado con gasolina.

3.2.3. Comparativo entre combustibles vehiculares.

El petróleo y sus derivados, y el carbón, son dos opciones con ventajas y desventajas muy similares. Aunque son combustibles de bajo precio tienen otros costos asociados con ellos. Son relativamente abundantes, especialmente el



carbón, así que las variaciones en el abasto son ligeras. Los precios del petróleo son más variables y el abasto está sujeto a la política internacional.

Los costos mayores asociados con el carbón y el petróleo son por su preparación para la combustión. En el caso industrial, el carbón debe ser pulverizado a un polvo fino y llevado al quemador. Se debe disponer después apropiadamente de la ceniza. El petróleo debe ser calentado y bombeado. Como ninguno de estos combustibles se quema tan limpiamente como el GN, tienen mayores costos de mantenimiento. Se debe remover el lodo y aceites, dar mantenimiento a las bombas y moledoras, deben ser limpiadas las tuberías y orificios y removidos los restos del carbón. El GN elimina todos estos rubros en el mantenimiento y costos asociados.

De todos los combustibles vehiculares alternativos que se mencionan en la actualidad, los principales por su factibilidad económica, técnica o su disponibilidad son el metanol, el GLP y el gas natural.

El metanol o alcohol metílico se obtiene usualmente del GN, por lo que en primera instancia tendrá siempre un costo mayor que este. Su ventaja más relevante es que se encuentra en estado líquido en condiciones normales de temperatura y presión. Otro alcohol, el etílico, también se considera un combustible alterno, se obtiene principalmente de biomasa aunque presenta algunas desventajas.

A escala mundial se percibe que en últimos tiempos existió una marcada tendencia hacia el uso del GLP, sin embargo, este gas tiene algunas desventajas importantes: Se obtiene del gas natural y del petróleo, sus reservas mundiales son pequeñas, usualmente no tiene la pureza requerida para ser un combustible alternativo eficiente –menos en México donde su composición es menor al 70% de propano–. En EUA donde se encuentran funcionando un gran número de vehículos a GLP se considera al GLP como propano al 90% de pureza por lo menos.



En un lugar sin gas natural se puede usar propano como fuente de energía y algunos automóviles alternativos podrían emplearlo. El propano es un buen combustible, limpio y ha sido usado por varios años. Sin embargo, cuesta típicamente más que el GN, varía ampliamente en su precio que cae en el verano o en meses de baja demanda y se dispara en el invierno o en meses de alta demanda. Estas fluctuaciones hacen difícil planear y pronosticar los costos de la energía y, por ende, las ganancias. Los factores que contribuyen a la fluctuación del precio también pueden afectar el abasto, si este queda igual mientras la demanda aumenta. Una industria debe ponderar el costo de parar su funcionamiento o de pagar adicionalmente por el combustible en un mercado de alta demanda. Estos inconvenientes no existen con el GN.

Adicionalmente el propano no es tan seguro como el GN. Un derrame de propano se acumula a nivel del suelo y se disipa muy lentamente. Este derrame de propano de bajo nivel es muy volátil y puede incendiarse desde una gran variedad de fuentes. El GN se disipa rápidamente a causa de que, al constar de una molécula pequeña es más ligero que el aire. Con los costos por aseguramiento aumentando cada año, el perfil de menor riesgo que ofrece el GN es muy atractivo económicamente.

Los demás combustibles alternativos que se consideran hasta la actualidad aunque son factibles en teoría, se enfrentan a obstáculos técnicos y económicos que no son salvables a corto plazo.



Tabla 15

Comparación de características físicas de combustibles

	Metano puro	GNC*	GNL	Diesel	Gasolina	Pro - pano	Metanol	Etanol
Calor BTU / gal de liq.	85			135	129	91.5	57	
Calor BTU / lb de líquido	23650			19550	21050	19700	8600	
Contenido Energético Calor de BTU / gal		120	82-85	128-135	117- 125	91.7		
Densidad (lb / gal)		1.3-1.6	3.5	7.14	6.2	4.8		
Densidad del Vapor	0.6	0.6	0.6	>4	3.4	1.52	1.1	1.59
Estado Físico	Gas	Gas	Liq.	Liq.	Liq.	Liq.	Liq.	Liq.
Flama luminosa	Si			Si	Si	Si	No	Ligera
Gravedad específica	0.424			0.85	0.81	0.51	0.79	
Gravedad específica: (aire = 1.00)	0.55			>4.0	3.4	1.52	1.11	1.59
Rango de Inflamabilidad		5-15%	5-15%	0.6-5.5%	1.4-7.6%	3.4-13.8%	6.7-36%	3.3-19%
Límite de inflamabilidad, vol. en aire: inferior	5 - 5.3			0.5 - 0.6	1 - 1.4	2 - 3.4	5.5 - 6.7	3.3
Límite de inflamabilidad vol. en aire superior	15			4.1 - 5.5	7.6	9.5 - 13.8	36 - 44	19
Luminosidad de la flama		60%	60%	100%	100%	60%	0.03%	3%
Índice de Cetanaje	130			45 cetano	89	110	105	
Peso lb / gal	3.53			7.12	6.8	4.23	6.6	
Presión de almacenamiento (psi)		3000-3600	40-200	Atm	Atm	120-160		
Temperatura de ignición	1350			600	680	750	660	
Temperatura de Auto ignición °F		999	999	485	495	919	867	793
Tóxico a la piel	No	No	No	Moderado	Moderado	No	Moderado - alto	Ligero
Tóxico a los pulmones	No	No	No	Moderado	Moderado	No	Moderada	Ligero
Fuente	Gas Natural	Gas Natural	GN	Petróleo	Petróleo	Petróleo, GN	GN, Otros HC's	Grano, Biomasa

[14]

* {Algunos valores pueden variar dependiendo de la presión atmosférica o la composición}

Tabla 16

Equivalencias energéticas de combustibles

Combustible y composición típica	Gasolina Regular Sin Plomo (C ₈ H ₁₅₋₁₈)	Gas natural (CH ₄)	Gas natural Licuado (CH ₄)	Diesel (C ₁₆ H ₃₄)	Propano (HD5) (C ₃ H ₈)	Metanol (CH ₃ OH)	M85 (85% metanol, 15% gasolina)
Capacidad de calentamiento neta o mínima, disponible para potencia	114,000 BTU / galón (líquido)	114,000 BTU / galón equivalente	76,000 BTU / galón (líquido)	128,000 BTU / galón (líquido)	82,450 BTU / galón (líquido)	57,000 BTU / gal (líquido)	65,500 BTU / gal M85 (líquido)
Factor: *	1	1	1.5	0.89	1.38	2	1.74

*Galones requeridos para el mismo kilometraje que la gasolina

[21]

Adicionalmente los beneficios del GNL sobre el GNC son:

Es más del doble de denso que el GNC, por lo tanto permite mayor almacenamiento a bordo y una mayor autonomía del vehículo.

Puede ser licuado en el lugar y por lo tanto es más barato de producir que el GNC. Puede ser purificado a más del 98% de metano lo que le da una calidad superior como combustible para motor.

La infraestructura de abastecimiento de GNL ha mostrado ser significativamente menos costosa que la de GNC para usuarios de grandes volúmenes de acuerdo a experiencias mundiales.

Las grandes desventajas del GNL son:

- a) La necesidad de una infraestructura perfecta.
- b) Requerimiento especial de manejo para un líquido criogénico.
- c) Los costos de la conversión van del 5% al 10% del costo original del vehículo (esto también es cierto para todos los diferentes combustibles alternos).

ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA



- d) Falta de familiarización del usuario. Existen una gran cantidad de mitos respecto a la seguridad del GN, en su mayoría debidos a la ignorancia sobre el producto.

Tabla 17

Algunas características relevantes del GNL

Características	GNL	PROPANO	Petróleo
Quemado limpio	Si	Si	
No contamina el suelo	Si		
No tóxico	Si		
Más ligero que el aire, disipa rápidamente	Si		
Alta temperatura de ignición	Si	Si	
Flama visible	Si	Si	Si
Limite de inflamabilidad	Si		
Vasija de doble pared	Si		
Calidad consistente de combustible	Si		
Constituyentes del combustible consistentes	Si		
Valor consistente de energía	Si		
Precio estable garantizado por varios años	Si		
Abasto abundante a lo largo del año	Si		Si
Bajos costos de preparación del combustible	Si	Si	
Abundante en el país	Si		

Tabla 18

Ventajas del GNL

CRITERIO DE SELECCIÓN	GNL
Seguridad	La más segura de todas las alternativas
Autonomía del vehículo	Comparable al diesel, superior al GNC
Relación de peso del vehículo	Comparable al diesel y superior al GNC
Abastecimiento de llenado rápido	Comparable al diesel, superior al GNC
Control de calidad del combustible	Comparable al diesel, superior al GNC
Rentabilidad	Permite costos de mantenimiento mejor calculados
Facilidad de mantenimiento	Comparable o mejor que el diesel
Desempeño	Comparable al diesel superior a las otras alternativas
Costo por galón equivalente	Competitivo con el diesel
Costos totales	La más económica de las alternativas
Disponibilidad doméstica	60 años de abasto
Reducción de emisiones criterio	Muy superior al diesel.

[1]



Aunque en México se está comenzando a convertir vehículos a GN, la tendencia observada es hacia el empleo del GNC, gas natural comprimido, preferentemente por sobre el GNL, gas natural licuado.

Sin embargo, independientemente de las características antes mencionadas del GNL y sus ventajas en cuanto a composición, costo directo y almacenamiento, existe una diferencia económica y técnica considerable que señala al GNL como una mejor alternativa que el GNC. En el Boletín Técnico "DIFERENCIAS TECNICAS Y ECONOMICAS EN EL USO DEL GNL Y GNC EN LA CIUDAD DE MÉXICO" realizado en agosto de 1985 por la E.P.G.L.C. se señala: ^[22] "

A- SUMARIO

Este documento fue elaborado para establecer las diferencias que existen al usar GNL o GNC en el transporte pesado de uso intensivo, como son los autobuses urbanos de pasajeros y el transporte de carga urbano y foráneo.

B. BASES

Tipo de vehículos: transporte pesado de uso intensivo como autobuses urbanos y carros de carga.

Almacenamiento de combustible: 80, 108 y 216 galones (302, 409 y 816 L).

Autonomía requerida: 332, 450 y 900 km respectivamente.

C. Diferencias

C.1. Peso de los tanques de combustible: la cantidad y capacidad de los tanques de combustible se determina en función del consumo diario, y la autonomía mínima requerida. Un autobús urbano de pasajeros consume un mínimo de 54 gal / día (340 L / día), un promedio de 70 gal / día (265 L / día), y un máximo de 90 gal

/ día (340 L / día), y requiere una autonomía mínima de 300 km. Considerando un 30 % de reserva, se debe poner un almacenamiento de combustible en los autobuses de:

Consumo gal / día (L / día)	Capacidad instalada gal (L)	GNL		GNC	
		No. de tanques	Peso de tanques (kg)	No. de tanques	Peso de tanques (kg)
54	80	1	179	12	1260
70	108	1	230	17	1785
90	188	2	409	29	3045

[22]

Notas:

Para GNC se consideran tanques de acero al carbón reforzado con fibra plástica. Se consideraron tanques de GNC de 6.5 gal con un peso de 105 kg cada uno. La capacidad seleccionada de los cilindros es de acuerdo al espacio disponible en el vehículo. Datos de catálogos de fabricantes. La capacidad instalada incluye 30% de reserva.

C.2. Costo de almacenamiento de combustible: el costo de los tanques de almacenamiento de combustible en un autobús urbano de pasajeros, de acuerdo a los datos del punto anterior es:

Capacidad instalada gal (L)	GNL		GNC	
	No. de tanques	Costo de los tanques (USD)	No. de tanques	Costo de los tanques (USD)
80	1	6,400	12	10,680
108	1	7,000	17	15,130
188	2	13,400	29	25,810

[22]

Notas:

El costo de los tanques de GNC y de GNL incluyen 19 % de gastos aduanales
El costo de los tanques de GNL incluyen la boquilla de llenado y accesorios



El costo de los tanques de GNC no incluyen la boquilla de llenado y accesorios. Existen cilindros de GNC más ligeros, construidos a base de grafito, reforzados con fibra de plástico cuyo costo es 60% mayor al de los cilindros considerados en la tabla anterior.

C.3. Tiempo de llenado de combustible: en el caso del GNC, el tiempo de llenado está en función de la capacidad de los compresores de la estación, de la capacidad de la cascada y del control secuencial. Considerando para la estación de GNC una capacidad de $2,000 \text{ m}^3 / \text{h}$ (8.8 gpm de gasolina equivalente) con 4 líneas de llenado, y para la estación de GNL 3 líneas de llenado con capacidad de 30 gpm cada una de ellas, los tiempos de llenado incluyendo tiempos muertos para una flotilla de por lo menos 100 autobuses son:

Consumo diario gal / día (L / día)	GNL Tiempo de llenado (min)	GNC Tiempo de llenado (min)
54	5.8	30
70	6.3	36
90	7.0	45

Notas:

Los tiempos de llenado incluyen 4 min. de tiempos muertos entre cada llenado.

C.4. Número de autobuses atendidos por estación de llenado: el número de autobuses que puede atender una estación de llenado, depende del flujo de llenado, del número de líneas de llenado y del horario disponible para llenar los autobuses. Considerando para GNC una estación de $2,000 \text{ m}^3 / \text{h}$ (8.8 gpm), con 4 líneas de llenado, y para el GNL una estación con 3 líneas de llenado de 30 gpm cada una, y 11 horas de llenado continuo de 8:00 PM hasta 7:00 AM en ambos casos, se pueden atender:

Para GNC

$$W = 2,000 \text{ m}^3 / \text{h} \times 11 \text{ h} / \text{día} = 22,000 \text{ m}^3 \text{ de GNC}$$



Si para efectos de simplificación consideramos que 1 m³ de GNC es aproximadamente 1 L de gasolina:

Wt: 22,000 m³ GNC = 22,000 L de gasolina = 5,812 galones cada día de GNC máximo

En el caso del GNL, la capacidad de llenado no es limitante debido a que se tendría:

$$W = 3 \times 30 \text{ gpm} \times 11 \text{ h} \times 60 \text{ min} = 59,400 \text{ galones por día}$$

Para el GNL la capacidad del tanque de almacenamiento, es la que determina el número de vehículos que pueden ser atendidos en una estación de llenado, como ocurre con las estaciones de gasolina y diesel. En este caso se está considerando un almacenamiento de 30,000 galones de GNL.

Por lo tanto, el número de autobuses que puede atender cada estación bajo la base anterior es de:

Consumo diario de combustible por autobús gal / día	No. de autobuses atendidos por día con GNL	No. de autobuses atendidos por día con GNC
54	340	107
70	315	83
90	283	64

[22]

C.5. Costo de la infraestructura de llenado por autobús: si consideramos que una estación de llenado de GNC de 2,000 m³ / h, tiene un costo de \$1,750,000.00 USD, y que una estación de llenado y almacenamiento de GNL para 340 autobuses cuesta \$1,300,000.00 USD, el costo de la infraestructura necesaria para el llenado por cada autobús es:



Consumo de combustible gal / día	GNL		GNC	
	Número de autobuses atendidos / día	Costo de infraestructura por autobús	Número de autobuses atendidos / día	Costo de infraestructura por autobús
		USD		USD
54	340	3,800	107	16,350
70	315	4,100	83	21,080
90	283	4,600	64	27,300

[22]

Como se puede observar, el costo de la infraestructura de llenado es mucho mayor para el GNC.

C.6. Infraestructura en gasoducto: el uso de GNC requiere una infraestructura en gasoductos con la que no se cuenta actualmente dentro de la Ciudad de México, ya que los gasoductos que están actualmente en operación están dedicados a abastecer a la industria que consume gas natural. El costo de esta infraestructura debe incluirse en los análisis de inversión para el programa de GNC.

El GNL en cambio, no requiere de gasoductos dentro de la Ciudad ya que se produce fuera de ésta y se transporta por pipas a cualquier sitio. Por esta característica, el GNL puede ser una solución para el uso del gas natural para carburación ya sea comprimido o licuado, en las zonas que no cuentan con gasoductos, con la ventaja de que el GNC que se obtiene a partir del GNL es de alta pureza.

C.7. Pureza del combustible: la tecnología "lean burn" o mezcla pobre en combustible de los motores dedicados a gas natural, requiere de una alta pureza en metano y una composición constante del combustible, para evitar daños en el motor y fuertes variaciones en emisiones contaminantes.

Desafortunadamente la composición del gas natural que se distribuye en la zona metropolitana de la Ciudad de México, es sumamente variable y el contenido de los compuestos contaminantes como N₂, CO₂, agua, compuestos de azufre, etc., llega frecuentemente a niveles que pueden dañar seriamente a



estos motores delicados. Este gas natural, es el mismo que se utilizaría como materia prima del GNC.

Por otro lado, dentro del proceso de producción de GNL, se purifica el gas natural antes de la licuefacción, con lo que se eliminan todos estos compuestos contaminantes y se alcanza una pureza mayor al 99% de metano, lo que garantiza que los motores dedicados a GN, con tecnología "lean burn" puedan operar en optimas condiciones sin sufrir ningún daño. " ^[22]

Como se puede observar, con las reservas debidas a la incorporación de nueva tecnología para la situación actual, el empleo de GNL para automotores es francamente superior al uso de GNC, ya sea por el peso de los tanques, por su costo, por el tiempo de recarga, por el número de vehículos reabastecidos y por el costo de la infraestructura para las estaciones de reabastecimiento. Hay que considerar, además, otros costos adicionales, como la instalación de tuberías para el GN.

Breve semblanza sobre el gas natural licuado (GNL):

En 1845 Michel Faraday fue la primera persona que licuó gas natural. En 1895 el Dr. Carl Bon Linde desarrolló su separación comercial del aire (N_2). La transportación por barcaza comenzó en 1914 por Godfrey Cabot. En 1942 fue construida en Cleveland, Ohio, EUA la primera planta licuadora de tamaño comercial. El metro de Houston en 1992 comenzó usando GNL como combustible vehicular con autobuses duales, 80% GN, 20% diesel. De 1992 a la fecha se han hecho mejoras continuas en la tecnología para los vehículos y las estaciones de servicio. La transportación de GN en estado líquido por vehículos comerciales en caminos públicos es una práctica madura y bien regulada con un excelente récord de seguridad obtenido a lo largo de más de 30 años ^[13].



El GNL es un combustible alternativo ideal para las flotillas de vehículos automotores ya que ofrece grandes ventajas como son: limpieza, seguridad, economía y confiabilidad.

Más limpio:

- Satisface las necesidades ambientales actuales, cumpliendo con los estándares de calidad para emisiones de contaminantes.
- Mejora el rendimiento por tener un alto octanaje su combinación con el oxígeno es más completa, brindando.
- Reduce las emisiones contaminantes hasta en un 80% –como promedio–.

Más seguro:

- El gas natural es más ligero que el aire y se dispersa rápidamente –por el tamaño de la molécula–.
- No contamina el agua ni el suelo.
- En todos los países en los que se utiliza ha sido aprobado por organismos gubernamentales para ser utilizado como combustible en automotores.
- Se requiere de un tanque a baja presión para su almacenamiento en el vehículo.
- Tiene una temperatura de ignición de 640 °C (la de la gasolina es de 320 °C.)

Más económico:

- Al ser limpia su combustión, disminuye la frecuencia de mantenimiento del vehículo y prolonga la vida del motor.
- Su rendimiento (km / L) es similar a la de los combustibles convencionales.
- Es más económico por litro equivalente.
- Es el combustible alternativo que ofrece las mayores reservas no controladas por la OPEP.



Más confiable:

- Por ser un gas permite un rápido encendido en clima frío o caliente.
- El gas natural al ser licuado ofrece una pureza constante.

3.2.4. Aproximación económica

Podemos intentar aproximar una evaluación económica para la conveniencia de la conversión a gas natural de una cierta porción del parque vehicular en la ZMCM si adicionalmente consideramos la siguiente información:

"El automóvil particular ocupa el 70% de la vialidad, transporta el 22% de los viajes por persona - día y consume 15 veces más combustible por persona que el sistema colectivo." De lo anterior se infiere que el mayor inconveniente del transporte particular no es la contaminación que emite –aunque su valor es muy considerable– sino la vialidad que ocupa (70%), ya que en las horas pico "... cuando transita el 60 % de los vehículos, el gasto de gasolina se eleva 1.5 veces y se duplica la emisión de humos." ^[23]

" Los automóviles particulares transportan sólo el 22.4% del total de viajes por persona al día; los taxis y microbuses el 59.9%; los trolebuses y el tren ligero el 0.7%; el Metro, el 12.6% y los autobuses el 4.4%, ... para 1990 se demandaron 19 millones de litros de gasolina al día: (casi un litro por habitante) además de 6 millones de litros de diesel. El desmesurado incremento del consumo de combustible parece estar asociado y coincidir con la puesta en marcha del programa restrictivo "Hoy no circula". ^[23]

Una estimación comparativa entre 1970 y 1990 sobre el número de vehículos y combustible consumido, indica un crecimiento directamente proporcional de éstos



con el de contaminantes emitidos, a pesar de que el uso de los combustibles mejorados data de 1984.

A lo anterior hay que agregar que en promedio los vehículos automotores tienen 9 años, casi el 90 % alcanza los 10 años. El parque vehicular en la ZMCM se estima en más de 3 millones y se calcula que se incorporan 160 mil vehículos más al año.” [23]

“Para 1997 había más de 3 millones de vehículos registrados en la ZMCM,... De estos 0.5% son camiones de pasajeros, 8.5 % son camiones de carga, 1.5 % son motocicletas y el 89.5 % son automóviles.” [24]

Otro dato relevante a considerar-para la ZMCM es la distribución de vehículos automotores que es: Gubernamentales :1.1 % Particulares: 71.2 % Taxis: 5.4 % Colectivos:1.9 % Transporte de carga: 17.8 Otros: 2.6 % [24]

Se puede obtener una evaluación rápida para el beneficio ambiental en el caso de que la conversión se haga solamente en vehículos de uso intensivo –lo que es mucho más factible de implementar a corto plazo que una conversión de la totalidad del parque vehicular–.

Los taxis y colectivos transportan el 59.9% de los viajes por persona – día, pero los taxis representan sólo el 5.4% y los colectivos el 1.9% de los vehículos automotores. Adicionalmente el 17.8% de los vehículos en la ZMCM corresponde a transporte de carga por lo que convirtiendo el $\{5.4 + 1.9 + 17.8\}$ 25.1% de los vehículos –o el 21%, según la AMGN–, que producen el 50% de las emisiones vehiculares en la ZMCM se puede esperar una reducción significativa en las emisiones contaminantes. *{al menos del 25% de toda la contaminación atmosférica en la ZMCM}*



La contaminación vehicular representa el 75% del total en la ZMCM (al menos).
El 25% (o el 21%) de los vehículos produce el 50% de la contaminación vehicular;
valor equivalente al 37.5% del total. {El restante 65.5% no se altera}

La conversión a GN reduce las emisiones en 66.67%.

La conversión de este 25% (o 21%) reduciría a $\{ 37.5\% * 0.333 + 62.5\% = \}$ 75% la
contaminación total. {La conversión de máximo el 25% de los vehículos reduce al
menos el 25% de la contaminación}.

Si consideramos el parque vehicular en 3.5 millones de automotores entonces el
25% son 875 mil vehículos. Para fines de simplificación se pueden considerar 900
mil vehículos. {Se están considerando todos los valores de tipo conservador}.

La conversión de 900 mil vehículos a gas natural puede reducir la contaminación
atmosférica –y los costos que conlleva– en la ZMCM en un 25%.

Si se considera una relación lineal entre los niveles de contaminación y los costos
que produce, se obtiene también una disminución del 25%. Esta cifra se puede
considerar muy conservadora debido al hecho de que no es de esperar que la
línea que relaciona los contaminantes con los costos sea una recta, ya que con
menores niveles de contaminación se pueden eliminar los días de contingencia
ambiental y la salud de la población en general, más allá del porcentaje disminuido
en contaminación. –De la misma forma en que un cierto aumento en la
contaminación provoca daños cada vez mayores por un "efecto acumulativo"–.

Si las cifras sobre los costos atmosféricos producidos por la contaminación
mencionadas en el primer capítulo son correctas –y se supone que en cada
estudio se emplearon cifras conservadoras, esto es, que se quedaron cortos– se
puede deducir lo siguiente:

El costo estimado de la contaminación atmosférica es al menos de 2 mil millones de dólares al año, ya que se están considerando sólo determinados contaminantes y situaciones,

De toda esta contaminación en la ZMCM el 25% {al menos} es producida por los vehículos de uso intensivo. (Que es equivalente 500 M USD {al menos} si se considera una relación lineal y se desprecia el "efecto acumulativo"). Convirtiendo 900 mil vehículos se tiene un ahorro de 500 M USD al año {al menos}.

De lo anterior se deriva que del costo de conversión del vehículo a gas natural 555 USD por vehículo {500 Millones USD / 900 mil vehículos} se recuperarían en forma de ahorro en los costos por contaminación en el primer año.¹ Cabe resaltar que, adicionalmente, el costo del gas natural resulta menor que el de otros combustibles.

Tabla 19
Reducción en la contaminación por conversión a gas natural de los vehículos de uso intensivo

Participación en la contaminación por vehículos							
Contaminación total 100%							
Otras Fuentes 25%		Contaminación por vehículos 75%					
						Uso Intensivo 37.5%	
Contaminación total tras la conversión a gas natural. Queda el 75% del total original.						Reducción por GN Disminuye el 25%	

¹ {Casualmente el costo actual para la conversión de un "microbus" a GN en la ZMCM es de aproximadamente 500 USD (2001)}.



Con los cálculos anteriores se puede apreciar que la conversión a gran escala de vehículos a GN, en primera instancia los de uso intensivo, es una solución altamente atractiva que representa un ahorro monetario directo y que acarrearía una serie de beneficios en salud, económicos y en imagen pública que a todos los habitantes de la ZMCM nos conviene.

3.3. Vehículos a GN.

3.3.1. Definición de Vehículos a Gas Natural (NGVs)

La mayoría de los NGVs, *{por sus iniciales en inglés}* son vehículos convencionales que han sido convertidos para funcionar con GN. El equipo esencial requerido para operar los vehículos, ya sean de uso ligero o pesado, de GN son: el sistema de administración del motor y, el cilindro de almacenaje de combustible de alta presión o de líquido criogénico.

La única gran diferencia entre un vehículo a gasolina y un NGV es el sistema de combustible. El GN es comprimido entre 3,000 y 3,600 psi (204 y 245 Atm) o licuado a -162 °C y es almacenado a bordo de los vehículos en cilindros instalados en el techo o bajo el auto. Cuando el GN es requerido por el motor, deja el cilindro y pasa a través de una válvula maestra viajando a través de un regulador de combustible (de alta presión para el caso del GNC) localizado en el compartimento del motor. El GN es inyectado a presión atmosférica a través de un mezclador de GN especialmente diseñado donde es apropiadamente mezclado con aire. El GN fluye entonces dentro de la cámara de combustión del motor y es encendido para producir la potencia requerida para impulsar el vehículo. Válvulas especiales operadas por solenoide previenen que el gas entre al motor cuando está apagado.



3.3.2. Clasificación de los NGVs

Existen diferentes tipos de vehículos que funcionan con gas natural. Esta elección dependerá de cada situación particular, de la disponibilidad de los vehículos a gas natural (convertidos o dedicados) y de los combustibles o los costos de éstos o sus instalaciones. Estos tipos de NGVs son:

- Vehículo bi-combustible (bi-fuel)

Un vehículo de este tipo puede ser impulsado con GN o con gasolina. Muchos son diseñados para cambiar automáticamente a gasolina cuando el tanque de combustible de GN se vacía. Estos vehículos dan la misma cantidad o ligeramente menos kilómetros por litro equivalente de GN que los vehículos que usan solamente gasolina.

- Vehículo dual

Es un vehículo que funciona con diesel solamente o con diesel y GN simultáneamente. En el vehículo dual la combustión del diesel sirve para encender el GN. El mismo principio se aplica en los vehículos duales a gasolina.

- Vehículos dedicados

Un NGV dedicado funciona solamente con GN. Los NGVs dedicados pueden ser vehículos a gasolina que han sido convertidos para funcionar con GN. Sin embargo, muchos NGVs dedicados de origen (OEM) son producidos por fabricantes de equipo original, como Ford, Honda o General Motors en el campo del mercado de trabajo ligero y patrocinados por los fabricantes de camiones y autobuses en el mercado de trabajo medio y pesado.



- Vehículos de trabajo ligero

De acuerdo con la agencia de protección ambiental (EPA) de EUA, un vehículo de uso ligero es un vehículo que pesa 8,500 libras –3,855.5kg– o menos.

En México la diferencia se establece en la NOM ^[25] que lo clasifica para 3,857 kg o menos.

- Vehículos de uso pesado

De acuerdo a la agencia de protección ambiental de EUA, un vehículo de uso pesado es un vehículo que pesa 8,500 libras –3,855.5kg– o más.

Para México el valor es de más de 3,857 kg. ^[25]

El gas natural resiste a la combustión aún en las condiciones de alta temperatura y presión como las encontradas en un motor a diesel. Normalmente es necesario el contacto directo con una chispa o flama para iniciar la combustión del GN.

La calidad del GN como combustible está basada en el contenido de metano, esto es, a más altas concentraciones de metano es mejor la calidad del combustible. El octanaje depende de esta concentración, mientras más alto el contenido de metano más alto será el octanaje y el combustible es más adecuado para altas relaciones de compresión.

Aún cuando los motores a base de gas natural estén funcionando con una mezcla ligeramente rica en combustible, no se detectan humos o combustible no quemado a simple vista.

De acuerdo a la Asociación Internacional de Vehículos a Gas Natural: ^[26]

“ En la actualidad todos los principales fabricantes de coches, camiones y autobuses han construido prototipos de NGVs dedicados y muchos NGVs están disponibles directamente del fabricante. En el modelo 1998, Ford ofreció un Crown



Victoria sedan dedicado –que se ha convertido en el modelo base para patrullas de policía en algunos departamentos en EUA–, camionetas de la serie E dedicadas y bi-combustible, pickups de la serie F y Contours bi-combustible.

General Motors ofrece camiones pickup y Cavalier de Chevrolet.

Honda proyectó la producción en masa el Civic a GN en 1998. Este vehículo fue el primero en cumplir los estándares de ultra bajas emisiones (ULEV); también recibió la certificación del Programa de Flotillas con Combustible Limpio en EUA.

Los fabricantes de autobuses como Blue Bird y Orion Bus Industries venden autobuses diseñados para trabajar con GN. Los principales fabricantes de motores diesel como Caterpillar, Cummins, Detroit Diesel, Mack y Deere Power Systems, están desarrollando o produciendo motores de uso pesado de GN para una gran variedad de aplicaciones vehiculares. 42 fabricantes producen más de 93 variedades de vehículos de GN, motores y chasis partiendo desde los vehículos de pasajeros de uso ligero hasta autobuses escolares y camiones para diferentes aplicaciones.”

3.3.3. Desarrollo de los NGVs

El GN ha sido utilizado en motores industriales estacionarios por varias décadas. Sólo ha sido en los últimos 15 años que las demandas ambientales en el mundo han impulsado la tecnología de los motores vehiculares a usar GN. El cambio de gasolina o diesel a GN brinda unos excelentes beneficios en emisiones y es conocida la importancia estratégica de que el GN es uno de los más abundantes combustibles en México y América del Norte.

En la industria automotriz los motores de gasolina fueron inicialmente modificados para usar GN por medio de varios paquetes –kits– de carburación, principalmente



para autos pequeños y de uso ligero. Estos motores son de estequiometría de compresión media y no turbocargados. Las conversiones de motores diesel originales usaron un sistema de fumigación para combinar diesel y GN.

El desarrollo de motores eficientes que alcancen el rango de "emisiones ultra bajas" (ULEV; un parámetro en EUA) implica demandas únicas en el abasto del GN como combustible vehicular, por esto se requiere que el combustible tenga una calidad consistente y predecible.

Desempeño de los NGVs

Una de las preocupaciones acerca de los NGVs es la potencia de los vehículos. Los vehículos de gasolina convertidos a gas natural están sujetos a una pequeña pérdida de potencia, sin embargo, los vehículos diseñados específicamente para funcionar con GN no tienen esta pérdida e incluso pueden tener mayor potencia y eficiencia. La causa de esto se encuentra en que el GN tiene un octanaje de 130 comparado con el rango de entre 87 y 94 de la gasolina.

Rendimiento de los NGVs

Se espera que los avances recientes en la tecnología en los NGVs mantendrán a la industria automotriz en mejora constante y con las tecnologías más avanzadas de los principales fabricantes de automotores. La industria de los NGVs está muy enfocada en nuevas áreas de investigación y desarrollo de infraestructura, vehículos y tecnología del motor y en la reducción de emisiones de sus vehículos.

Equipos para los NGVs

Los mecanismos de conversión de los NGVs son compatibles con el cuerpo y los multipuertos de inyección de combustible de los motores. Los kits de conversión de circuito cerrado compatibles con computadoras están ya siendo desarrollados y



vendidos. Esto mejorará el desempeño de los NGVs bi-combustible y reducirá aún más las de por sí bajas emisiones vehiculares en los vehículos a gas natural.

Equipo para GNL

El GN como combustible se ha de almacenar en recipientes que estén de acuerdo a su estado físico y con los parámetros específicos de temperatura o presión de cada caso.

En el caso del GNL, este es almacenado en un tanque aislado al vacío a su temperatura de licuefacción. El tanque de GNL se asemeja a un termo, el tanque interior está hecho de acero inoxidable. Un espacio de vacío separa el tanque interior del tanque exterior y una película de aislante térmico –mylar– es puesta alrededor del tanque interior para mejorar el aislamiento. El tanque de combustible es el artículo más caro de los componentes de la conversión, su costo varía dependiendo de la capacidad del tanque.

Los tanques se pueden diseñar para que contengan combustible ya sea para 5 ó hasta 20 días sin evaporación, dependiendo de la presión de operación del tanque y la cantidad de aislamiento. A presión atmosférica, el GN hierve a -160°C . Sin embargo, la presión de operación del tanque incrementa esta temperatura de ebullición, igual que en una olla de presión. La presión de operación del tanque de GNL rara vez excede 150 psi; una serie de válvulas de alivio permiten al vapor del GNL que escape si la presión sobrepasa las 150 psig.

El equipo de control carburador mezclador de combustible usado en muchos vehículos antiguos está dando paso a los sistemas electrónicos de manejo de motor disponibles, esto asegura que las emisiones de los NGVs sean comparables con las mejores emisiones de los demás combustibles tradicionales y alternativos. De la misma forma los cilindros de almacenamiento de combustible de acero de



alta presión que tienen el inconveniente del peso están siendo sustituidos por cilindros de materiales compuestos más ligeros.

Como parte del equipo se usa un sistema de suministro de combustible. La función del sistema de suministro de combustible es evaporar el GNL y entregarlo al sistema de control. El sistema de suministro debe entregar el vapor del GNL a una presión específica, aunque la presión del tanque varíe.

También se usa un sistema de control de combustible. El sistema de control de combustible mezcla el vapor en cantidades específicas de aire y conduce la mezcla al motor para su combustión. Si el vehículo tiene un sistema dual de combustible, es decir, puede quemar dos combustibles simultáneamente, el segundo puede ser mezclado con el vapor del GNL en el sistema de control de combustible. El tiempo y los ajustes de la relación combustible/aire en el motor, pueden hacerse para compensar la baja velocidad de ignición del gas natural y la relación de la combustión. En el caso de que un motor de diesel sea convertido para funcionar al 100% con gas natural, debe añadirse una bujía, ya que el gas natural, no se puede encender por la pura presión.

Como una revisión de los puntos relevantes para los vehículos que funcionan con GNL cabe mencionar:

- El diseño actual del tanque de GNL hace que el peso completo sea igual que el de diesel
- Para el potencial derrame de GNL los tanques de doble pared cumplen con altas normas criogénicas; son instalados grandes tanques de almacenamiento en el exterior de los emplazamientos donde se almacena el GNL y los tanques están rodeados por una pared extra.
- Los motores de GN están disponibles de: Cummins, Detroit Diesel, Caterpillar, Ford, Hercules, Mack.



- El uso de motores nuevos dedicados de GNL reporta una relación de combustible mejorada de entre 1.2 y 1.3 litros de GNL por un litro de diesel ^[1]. El GNC agrega el peso del tanque de combustible. El GNC tiene un valor variable de octanaje. El GNC tiene un valor variable de energía. El GNL no agrega peso ni tiene estas variaciones.
- Los constructores de camiones están optimizando los diseños para acomodar fácilmente el equipo de GNL en los vehículos.
- Los fabricantes de chasis de camión han diseñado vehículos para acomodar el equipo de GNL.

Características de seguridad de los NGVs

El GN no sólo es limpio, abundante, de bajo costo y un combustible que se puede producir en el país para vehículos a motor. También es seguro.

Cualquier combustible para motor de vehículo puede ser peligroso si no se maneja en la forma apropiada. Los combustibles contienen energía que debe ser liberada por el quemado. La gasolina es un combustible poderoso pero con el tiempo hemos aprendido a manejarla con seguridad. Lo mismo se aplica para el gas natural. El GN genera en forma segura electricidad, calefacción para hogares y energía para cocinar alimentos, pero como la gasolina, el gas natural debe ser entendido y respetado para ser usado con seguridad.

El GN es un combustible que se produce naturalmente y que requiere poco procesamiento antes de usarse. Así como con todos los combustibles para vehículos, el GN puede ser usado con seguridad si son seguidos procedimientos simples y de sentido común. De hecho el GN tiene ventajas de seguridad comparado con la gasolina y el diesel, no es tóxico, y no representa contaminación potencial para el suelo o el agua en el caso de una fuga de combustible. Se



agrega un odorante para proveer un olor distintivo e intencionalmente desagradable que es fácil de reconocer. El olor es detectable a entre 1/5 y 1/10 del límite menor de inflamabilidad del gas.

Los NGVs tienen un excelente récord de seguridad por dos razones principales: las propiedades del combustible en sí mismas y la integridad del NGV y su sistema de entrega de combustible. La gasolina y el diesel se queman a concentraciones mucho menores y se inflaman a menores temperaturas que el GN. Aunque toma una muy pequeña cantidad de energía prender una mezcla inflamable de aire y GN, gasolina o diesel, el GN se quema a una temperatura algo menor.

Tabla 20

Estos son algunos valores importantes que determinan la seguridad:

Propiedad	GN	Gasolina	Diesel
Límites de inflamabilidad	5 al 15	1.4 a 7.6	0.6 a 5.5
Temperatura de autoignición °F	842	572	446
Energía mínima de ignición en el aire (10^{-6} BTU)	0.27	0.23	0.23
Temperatura pico de la flama °F	3423	3591	3729

[27]

Del pozo de gas al motor del vehículo el GN requiere muy poco procesamiento para hacerlo utilizable como combustible. La gasolina y el diesel deben ser procesados del petróleo crudo en grandes y complejas refinerías de petróleo. Después de que el vapor de agua, el azufre y los hidrocarburos pesados son removidos el GN fluye a través de la tubería —que es la forma más segura de transportar energía, de acuerdo al departamento de transportación de EUA— directamente a la estación de abastecimiento donde es comprimido o licuado para su uso. Alternativamente puede ser licuado a temperaturas criogénicas en el sitio



o en una instalación central y entregado por autotanque. La gasolina y el diesel son entregados a estaciones de abastecimiento por autotanque sobre la carretera, lo que implica mayores costos, riesgos y contaminación.

Aunque el uso de altas presiones de almacenamiento puede parecer peligroso, la compresión, el almacenamiento y el abastecimiento de los NGVs cumplen con las estrictas normas de seguridad aplicables de la industria y del gobierno. Cabe recordar que los gases a alta presión son usados cotidianamente con seguridad en aplicaciones industriales y médicas.

Sistema de seguridad en los NGVs

El sistema de seguridad en los tanques de los vehículos a gas natural está compuesto por una válvula de alivio y un disco de seguridad. Cuando la presión en el tanque se incrementa, esta puede ser aliviada de dos formas: 1) sacando producto del tanque o 2) venteando el vapor de gas natural a través de la válvula de alivio. Si el tanque permanece igual y ninguna de las medidas anteriores se lleva a cabo, el tanque está equipado con un disco de ruptura (seguridad), que se romperá cuando las presiones del tanque excedan los niveles de las presiones del diseño, permitiendo de esta manera que el gas sea liberado a la atmósfera. El disco de seguridad es un pequeño disco metálico que se diseña para romperse a presiones específicas.

Debido a que los vehículos son raramente utilizados por más de unas pocas horas, los mecanismos de relevo de presión no son usuales. En lugares donde los vehículos son retirados por varios días, como cuando se hace una reparación, las líneas de recuperación del gas natural que se instalan en los sitios de abasto del combustible se pueden utilizar para el gas venteado de los tanques de GNL.



Los vehículos impulsados por GN son diseñados y construidos para ser seguros en operación normal y en choques. Los nuevos NGVs son sujetos a las mismas pruebas de choque que otros vehículos. El sistema de combustible de los NGVs en EUA debe cumplir con las normas de seguridad federales para motores de vehículos. Los cilindros de GN son más gruesos y más fuertes que los tanques de gasolina o diesel. Las normas industriales requieren de ellos que soporten 11,250 ciclos de llenado, y aguantar mucho más allá de los riesgos de servicio y ambientales normales. Los cilindros deben también soportar una prueba de hoguera y una penetración de una bala de calibre 30 sin romperse.

El combustible, las estaciones de servicio, las estructuras de estacionado interno y los estacionamientos de reparación son construidos para asegurar altos niveles de seguridad. Los requerimientos para instalaciones que manejen GN y NGVs pueden diferir de aquellos para vehículos de gasolina o diesel. Por ejemplo con diesel y gasolina escapando se forman charcos en el suelo. El GN normalmente se eleva hacia el techo y se dispersa. Por lo tanto el peligro de fuego es mayor cerca del suelo para combustibles líquidos y cerca de los techos cerrados para el gas natural.

El tiempo ha probado que los NGVs son seguros en operación. Basado en una inspección de 8331 instalaciones de NGVs en escuelas en EUA, vehículos de flotillas municipales y de negocios que viajaron 178.3 millones de millas:

- Los daños de la flota de vehículos NGVs fueron un 37% menores que en la flota de vehículos a gasolina.
- No hubo fatalidades comparadas con las 1.28 muertes por cien millones de millas para flotas de vehículos a gasolina.
- El rango de colisión para flotas de vehículos NGVs fue 31% menor que el que se presentó para flotas de vehículos a gasolina.



- La flota de 8331 NGVs estuvo involucrada en 7 incidentes de fuego solamente uno de los cuales fue directamente atribuible a una falla del sistema de combustible de GN.

Aunque hay aproximadamente 85 mil NGVs operando actualmente en los EUA no ha habido una ruptura de tanque en dos años. En Italia donde hay más de 300 mil NGVs en operación ha habido solamente una ruptura de tanque de combustible durante los últimos 3 años según los datos disponibles.

Aún más importante que las estadísticas, es la confianza que sienten los usuarios de NGVs. Según fuentes especializadas en EUA "... más del 20% de los nuevos autobuses en tránsito son impulsados por GN. La policía en Rocky Hill reporta "el récord de seguridad de los NGVs-ha sido excelente". El departamento de energía establece que "después de pruebas rigurosas se encontró que los NGVs son tan seguros y confiables como los vehículos convencionales.

No sólo hay agencias de tránsito y policía usando NGVs —esto es cierto incluso en la ZMCM—, más y más autobuses escolares son ahora impulsados por GN en los EUA. En 1996 el departamento de energía de EUA trabajó con un vendedor mayorista de autobuses escolares para desarrollar un autobús con la categoría de "ultra seguro y de bajas emisiones" —ULEV— impulsado por GN. Autobuses escolares de ese vendedor y de otros más, usando ese u otros motores a GN, están en uso actualmente en los EUA." [28]

En el comportamiento en choques de los NGVs la fortaleza de los cilindros de GN y el sistema de combustible generalmente evitan cualquier filtración o fuego. No sólo en EUA, sino también en México y todos los países donde se han realizado pruebas con NGVs, estos han demostrado ser tan seguros —incluso más— que los automóviles propulsados por combustibles tradicionales. Siendo los mecanismos



tan seguros como se ha descrito hasta ahora, queda por tratar el punto más delicado en el manejo del combustible para los NGVs; la recarga o reabastecimiento del GN –ya sea licuado o comprimido– es la actividad que puede presentar mayor riesgo en todo el ciclo de empleo de los vehículos a gas natural –debido a la participación humana directa–.

En esta misma operación cabe mencionar que uno de los más severos inconvenientes que se presentan –al menos en México– con el uso del combustible alterno GLP, es el del reabastecimiento en las calles, y no en gaseras diseñadas para tal efecto, a partir de autotanques de GLP destinado a consumo doméstico y no de carburación. Se incurre en esta práctica por varios factores siendo el principal que en cierto periodo, el precio de venta fue mayor para el GLP destinado a carburación –diferencia lógica si se considera que se requiere mayor pureza para obtener alguna ventaja en cuanto a emisiones de contaminantes–.

La práctica del reabastecimiento en forma directa de los autotanques para abasto doméstico genera no sólo cantidades nada despreciables de contaminantes –especialmente hidrocarburos evaporados durante la carga sin equipo especial– sino que además eleva en gran medida el riesgo implicado en el manejo del combustible.

Con el gas natural –GN– no es posible incurrir en estas prácticas inseguras; para alimentar el GN, licuado o comprimido, se requiere equipo especial que además de impedir prácticas no programadas permite establecer claramente las medidas de seguridad necesarias para evitar incidentes en el manejo del combustible. En el caso del GNL, que por ser un líquido criogénico se podría pensar que presenta grandes riesgos, basta con proteger adecuadamente al operador que abastece el GNL y a las instalaciones para disminuir significativamente el riesgo asociado durante su ciclo de empleo como combustible.



3.3.4. Ciclo de empleo

Como una parte del ciclo completo de empleo del GN en vehículos automotores se considera especialmente la recarga de combustible. Es en este punto donde se debe hacer énfasis en la seguridad en el manejo del GN debido a que es la única parte del proceso en que puede esperarse que el usuario pudiese tener contacto con el combustible.

Abastecimiento

Un NGV puede ser reabastecido de GN en un número creciente de estaciones públicas que estén disponibles a lo largo del país.

En México existen en la actualidad siete (7) estaciones de abasto de GN (comprimido) dos de ellas en la ZMCM, tres en Monterrey, una en Querétaro y una en Saltillo ^[8]. Como referencia: en EUA hay más de 1200 estaciones de abastecimiento de GN que operan en 46 estados y el distrito de Columbia, donde más de la mitad de éstas están abiertas o disponibles al público. Compañías petroleras como Unocal y Shell están involucradas en estaciones de abastecimiento público de NGVs. Muchas compañías proveen equipos compresores para estación de GNC o gas natural comprimido en el sitio para clientes y flotillas grandes.

En los EUA los NGVs también pueden ser reabastecidos desde un pequeño dispensador conectado directamente a la línea de GN de la casa o del negocio. El elemento determinante es la tubería de alimentación. En el caso de la ZMCM la inexistencia de la tubería de gas natural ha obstaculizado más de una vez proyectos que pretenden su empleo.



Tiempo de llenado

En el abastecimiento del GNL el tiempo de llenado es de aproximadamente 7 minutos. El abasto de GNL es similar al de gasolina o diesel –salvo en la temperatura– y requiere un tiempo equivalente de llenado.

En el caso del GNC hay dos modalidades, el llenado lento, que puede tomar algunas horas –si el gas se va comprimiendo progresivamente– y el llenado rápido, que requiere un tiempo similar al del GNL –este GN debe ser almacenado previamente y comprimido en el llamado ciclo en cascada–.

Compresión o licuefacción del GN

El GNC se puede transferir a los automóviles de dos formas: como llenado lento y como llenado rápido. El llenado lento se logra haciendo llegar a los vehículos el combustible de manera directa, es decir, desde la salida del compresor. Funciona bien cuando se pueden dejar los vehículos por un periodo determinado, por ejemplo durante la noche, donde es recargado para poder ser utilizado al día siguiente. El llenado rápido requiere forzosamente utilizar el sistema de almacenamiento en cascada; con este sistema se puede recargar el vehículo en el mismo tiempo que se necesita para llenar un tanque de gasolina.

El almacenamiento en cascada consiste en una serie de depósitos que almacenan gas bajo presión. La cascada proporciona una reserva de GNC disponible para uso inmediato. Una vez que la cascada se ha reducido a cierto nivel, el compresor entra en funcionamiento para rellenarla. El almacenamiento en cascada consta normalmente de tres bancos. El propósito es permitir que los vehículos se abastezcan a su máxima presión aún cuando el nivel del almacenamiento en cascada esté parcialmente reducido.



Una estación típica de carga de GNC consiste en un compresor, un almacén pequeño de GNC, conexiones para los vehículos y controles e instrumentos de seguridad, con un costo que varía dependiendo del uso.

Para el caso del GNL, este es transformado a partir del GN enfriándolo y condensándolo a aproximadamente $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Al igual que la fuente de GN el GNL está hecho de una mezcla de hidrocarburos y compuestos inertes, con la diferencia de que al GNL le han sido quitados estos elementos que se congelan a esa temperatura y sólo el metano permanece. El hecho de que la composición de GN varíe es una consideración importante en el diseño de una planta de GNL. La composición del GN varía de pozo a pozo y de tubería a tubería, el GNL es relativamente ligero; su densidad es la mitad que la del diesel y contiene dos tercios del valor de calentamiento del diesel por volumen. Una instalación de licuefacción del GNL incluye muchos componentes cada uno de los cuales requiere consideraciones especiales de diseño.

Los procesos de operación principales incluyen: limpieza del GN o pretratamiento, refrigeración o licuefacción, tanques de almacenamiento y sistemas de evaporación, tuberías de traslado, sistemas de entrega así como camiones para traslado, sistemas de seguridad para protección contra el fuego, seguridad, detección y contención de derrames, sistemas de servicio, generación de poder, combustible, agua, etc.

El diseño y ubicación de cada uno de estos componentes en la instalación de GNL como un todo es llevado a cabo por aspectos de seguridad, por sus características criogénicas y de inflamabilidad. Las prácticas y procedimientos aceptados en EUA son reconocidos en todo el mundo, en la industria y en las regulaciones y normas gubernamentales.



Han sido desarrollados materiales especiales que son adecuados para temperaturas criogénicas para la producción, el manejo y el reabastecimiento de GNL, así como para sistemas de aislamiento criogénico y otros equipos.

Plantas licuefactoras

Actualmente se pueden conseguir plantas licuefactoras de GN prearmadas y probadas que vienen listas para usarse en cuanto son conectadas a la toma de gas y a los tanques de almacenamiento de GNL. Existen dos tipos, para gas natural y para metano de baja graduación.

Antes de entrar al licuefactor el CO₂ y el agua son removidos; el gas es comprimido a 2,300 psig y enfriado a -68 °C (-90 °F). El gas es expandido entonces, hasta 15 psig en dos etapas enfriándose hasta -154 °C (-245 °F) obteniendo una cierta proporción de GN licuado. El GN que no es licuado se regresa al compresor para reingresar al proceso; el GNL es alimentado al tanque de almacenamiento.

Estas unidades están diseñadas para ser completamente automatizadas, todos los parámetros de cuidado como las temperaturas, las presiones y los flujos son monitoreados continuamente. Así, en caso de cualquier mal funcionamiento el sistema se apaga automáticamente, cerrando todas las válvulas.

Estas plantas licuefactoras se encuentran disponibles en diferentes capacidades – 100, 150, 250, 400 y 1000 millares de pies cúbicos al día (kft³ / día)–. Esta es la capacidad de recepción de gas para ser licuado. Como referencia se considera que un millar de pies cúbicos se licúan a 12 galones de GNL. Esta planta usa aproximadamente entre el 15% y el 20% del GN para funcionar, por esto no requiere una entrada adicional de energía. Se resalta aquí la incongruencia de



emplear otra fuente de energía cuando este es el elemento de trabajo, más aún cuando la fuente adicional –como la electricidad– es contraproducente económica y ambientalmente.

El segundo proceso de licuefacción del GN a GNL implica el poner en contacto el gas con un fluido extremadamente frío cuya temperatura de ebullición sea menor a la del gas natural, este líquido es usualmente nitrógeno líquido. Por transferencia del calor en un intercambiador se enfría el GN hasta que se licúa, siendo entonces separado para su almacenamiento.

La conveniencia de uno u otro sistema de condensación del GN depende de diversos factores tales como la pureza del GN, la disponibilidad del medio refrigerante a bajo costo y otros.

Como se mencionará más adelante, en México ya fue instalada la primera planta licuefactora de GN para empleo automotriz con el proceso de transferencia de calor a nitrógeno líquido.

Requerimientos de pureza del combustible

La pureza del GN como combustible vehicular es indispensable para obtener la máxima reducción de emisiones y obtener el mejor desempeño del motor. Los parámetros empleados comúnmente para determinar la calidad del GN, la capacidad calorífica mayor –HHV– y el Índice Wobbe, no son suficientes para esta aplicación.

Como ejemplo se muestra una tabla en la que para una gran variación en el contenido de metano en el GN, el Índice Wobbe y la capacidad calorífica mayor resultan prácticamente iguales.

Tabla 21

Diferentes composiciones

Composición (% en mol)											S.G.
C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	C ₆	N ₂	CO ₂	O ₂	HHV	# Wobbe	S.G.
86	12	0	0	0	0	2	0	0	1080.6	1371	0.6215
93	0	3	2	0	0	2	0	0	1079.6	1371	0.6203

[11]

Además de estos datos es necesario considerar que la composición en las tuberías de GN puede variar incluso, día a día. Como ejemplo se muestra una tabla en la que se reportan los resultados de la medición de tres días a lo largo de una semana del mes de mayo de 1994 en una misma toma en EUA en la que la capacidad calorífica varía considerablemente así como la composición.

Tabla 22

Variación semanal

Composición (% en mol)															S.G.
Día	C ₁	C ₂	C ₃	i-C ₄	n-C ₄	i-C ₅	n-C ₅	C ₆	N ₂	CO ₂	O ₂	HHV	Wobbe	S.G.	
12	80.9	10.1	5.2	0.48	0.9	0.11	0.08	0.03	1.17	1.03	0	1180.4	1417	0.6935	
17	94.26	2.8	0.51	0.05	0.05	0.02	0.01	0.02	0.64	1.64	0	1019.5	1323	0.5937	
19	87.68	6.61	1.65	0.15	0.25	0.04	0.03	0.03	1.02	2.54	0	1061.0	1327	0.6392	

[11]

Como se puede observar fácilmente si el GN no es purificado —o licuado— las variaciones en la composición pueden afectar el rendimiento de los vehículos a gas natural.

Los costos dominantes de purificar el GNL hoy en día son los costos del GN, el costo de la licuefacción y el costo de transportación. La sección de purificación de una instalación de GNL que produce metano puro al 99.5% representa menos del 5 % del costo total de capital para la instalación. Esto se traduce a una costo de menos de un centavo de dólar por galón de acuerdo a la experiencia internacional.



La tecnología está disponible actualmente de forma que permite la producción de metano al 99.95% de pureza con costos similares por galón.

Por esto la calidad de combustible necesaria para usar un combustible vehicular alternativo de calidad, GNL o GNC no se puede dejar a la suerte si tiene influencia en el desempeño eficiente o en las bajas emisiones. Ni el uso del contenido de energía y/o el índice Wobbe es un parámetro confiable de la medida de la calidad del combustible vehicular y no da un control de calidad suficiente para asegurar el desempeño apropiado del motor o emisiones consistentemente buenas para motores que empleen la estequiometría de combustible o la tecnología "lean burn". Los estándares de GNL para la transportación deben especificar el porcentaje de inertes e hidrocarburos pesados para asegurar que se cumplen los parámetros de desempeño deseados. Debe convertirse en la norma actual una pureza del 99,5% de metano para el grado de combustible para transportación del GNC y el GNL si es que desean ser alcanzados el alto desempeño y los beneficios de excelentes emisiones del metano.

Costo de los NGVs

El costo de convertir un vehículo de uso ligero a GN se encuentra entre 1,000 y 6,000 ^[26] dólares dependiendo del país, el tipo de equipo y las regulaciones locales. Para vehículos de uso pesado la diferencia está basada en los requerimientos de autonomía que determinan el tamaño y el costo de los cilindros de almacenamiento.

El costo de la conversión de un autobús de ciudad se estima que se encontrará entre los 14 mil y los 50 mil ^[26] dólares, dependiendo de la tecnología de conversión y la autonomía.



Los NGVs dedicados cuestan de 3,500 a 7,000 ^{[26] (2000)} dólares más que los vehículos a gasolina. Mientras más vehículos sean vendidos la economía de escala disminuirá el precio. El departamento de energía de los EUA estima que los NGVs costarán aproximadamente 800 dólares ^{[26] (2000)} más que los modelos comparables de gasolina cuando sean producidos en masa.

Sin embargo, el GN cuesta significativamente menos que la gasolina y el diesel. Para muchas flotillas los costos iniciales pueden ser recuperados en la vida del vehículo.

3.4. Experiencias mundiales en el uso de vehículos a GN

El gas natural ha sido ampliamente empleado en el mundo como combustible vehicular. Se estima que para el año 2010 habrá 11 millones de autos a GN en EUA. La tendencia en el uso de este combustible es clara, tanto, que en PEMEX para enero de 1992 en su publicación "Sustitución de gasolinas en vehículos automotores por gas licuado y gas natural en el valle de México" ^[29] reconocía: "... cabe destacar que el uso del gas licuado (GLP) como carburante es muy limitado, y en general la tendencia internacional es hacia la utilización del gas natural." ♦

3.4.1. Inicios

Se reconoce a Italia como el primer país que realizó una conversión masiva de vehículos para funcionar con GN. Esta conversión incluyó 300,000 vehículos y 400

♦ {Después de esta fecha se hizo énfasis en la conversión de autos y microbuses a GLP ¿Por qué?}



estaciones de servicio en 1940. En 1979 Nueva Zelanda introdujo 125,000 vehículos a GN y 80 estaciones de servicio. En 1983 la Comunidad de Estados Independientes –CEI– convirtió 200,000 vehículos para trabajar con GN.

3.4.2. Empleo actual

El creciente interés en los NGVs permitió la formación de la Asociación internacional de vehículos a GN en 1986, que ahora tiene más de 210 miembros de 32 Países, y el establecimiento en 1994 de la asociación europea de vehículos a GN con más de 120 miembros de 20 países.

Uso de los NGVs

Más de 85 mil NGVs están en las carreteras de EUA hoy en día. Los NGVs tienen un récord largamente establecido en Europa, Canadá, Nueva Zelanda y Australia. En Canadá cerca de 20 mil NGVs operan con una red de 222 estaciones publicas de abastecimiento. Argentina tiene más de 400 mil NGVs y la CEI más de 30 mil, con planes para convertir un millón de vehículos para el final de la década, Japón predijo que su número de NGVs se incrementaría a 200 mil para el 2000. Mundialmente más de 1 millón de NGVs se encuentran en uso en países que ahora incluyen a Uzbekistan, Venezuela, México, las Filipinas e Indonesia.

En la siguiente tabla publicada por la AMGN se muestran los principales países con NGVs y sus estaciones de servicio.



Tabla 23
Países con NGVs

País	Vehículos convertidos	Estaciones de Servicio
Argentina	462,186	830
Italia	320,000	320
Estados Unidos	90,000	1,250
Brasil	60,000	55
Rusia	30,000	208
Venezuela	27,542	151
Canadá	20,505	222
Egipto	19,000	35
Nueva Zelandia	12,000	100
India	10,000	11
Japón	6,684	107
China	6,000	70
Alemania	5,000	110
Bolivia	4,860	17
Colombia	4,500	22
Paquistán	4,000	30
Trinidad y Tobago	4,000	12
Malasia	3,700	17
Francia	3,309	105
Indonesia	3,000	12
Chile	2,000	5
México ^{a IV/2001}	1,997	7
Resto	5,387	176
Total	1,105,670	3,872

[8]

3.4.3. Mecanismos de apoyo

El fomento en el uso de combustibles vehiculares alternos en algunos países ha sido impulsado por diversos mecanismos que motivan a los usuarios al cambio, y a modo de ejemplo se exponen algunos de estos mecanismos.

- Estados Unidos

Emitió en el año de 1990 una ley federal denominada "Clean Air Act Amendments" que establece los siguientes lineamientos generales:



- a) establece las estrategias para reducir las emisiones en diversas ciudades, clasificadas según el nivel de contaminación atmosférica
- b) establece los porcentajes de compras de vehículos nuevos a partir de 1998, que las flotillas privadas, federales y estatales con más de 10 unidades, deberán adquirir con combustibles alternos.

La Energy Policy Act 1992 refuerza el uso de combustibles alternos como parte de la estrategia para reducir las importaciones de petróleo *{en México se podría disminuir la importación de gasolina}* y fomentar el uso de combustibles domésticos a través de los siguientes mecanismos:

- Se establece un programa de adquisición de vehículos a combustibles alternos de flotillas Federales Estatales más agresivo que el contemplado en el "Clean Air Act"
- Adicionalmente, se han emitido las Ordenes Ejecutivas Federales 12759 y 12844 que refuerzan el uso de combustibles alternos en las flotillas federales señalados por el "Energy Policy Act".
- Nueva Zelanda

Estableció un plan estratégico para convertir el 10% de la flotilla nacional a gas natural.

- Australia

Plan 10/10 que significa la sustitución del 10% del transporte de gasolina y diesel por gas natural.

- Argentina

Es uno de los países con mayor uso de gas natural en vehículos. Su gran éxito se debe a una diferencia mayor del 50% entre el precio del gas natural y el del litro equivalente de gasolina. Esta diferencia ha permitido desarrollar la infraestructura y la creación de toda una industria y, que en 10 años, se conviertan 300,000 vehículos.



☺ 4. Experiencias en México

4.1. Experiencias en la ZMCM en la conversión de vehículos a GN

En la ZMCM se han desarrollado diversas pruebas con combustibles alternativos como una medida para controlar la contaminación atmosférica que impera en la ciudad más grande, con mas población y más contaminada del mundo.

Entre los proyectos realizados para dsminuir la contaminación se encuentran las pruebas hechas con metanol –por ejemplo, el caso de un autobús con recorrido sobre la avenida de los Insurgentes–; la prioridad que se ha dado a los transportes del sistema eléctrico –metro, trolebús, tren ligero y tren férreo– que contribuyen efectivamente a disminuir la emisión de contaminantes en la ZMCM aunque la trasladan de hecho a los lugares donde se genera esta electricidad; y la conversión de vehículos a gas licuado de petróleo –incluyendo una gran cantidad de microbuses–.

Adicionalmente se han efectuado pruebas con GN que han resultado en la introducción, aunque a pequeña escala, de vehículos a GNC. Algunas de las pruebas realizadas con GN se enumeran a continuación.



4.1.1. Proyectos desarrollados con vehículos a GN en la ZMCM

En México se realizaron pruebas en forma experimental en 1988 para usar GN mezclado con diesel (80% diesel - 20% GN) para emplearlo en algunos autobuses de la empresa E.A.U.P.C.M. Aparentemente a pesar de ser una proporción pequeña de GN se reportó una disminución en las emisiones de contaminantes pero con el inconveniente de una cierta pérdida de potencia —del 20%—, aunque dadas las velocidades promedio en la ZMCM esta cantidad es despreciable.

Se han realizado pruebas con motores a GN en el Instituto Mexicano del Petróleo —IMP—. Se realizaron también pruebas en la E.A.U.P.C.M para motores de camión dedicados a GN. Se encuentran en funcionamiento algunos vehículos prototipo con equipos duales y bi-combustible en diferentes puntos del país.

También han realizado pruebas de conversión de vehículos a GN algunas compañías e instituciones importantes como son: Dirección de Ecología del GDF, Dirección de Ecología del Edo. De México, Organización Bimbo, Servicio Panamericano de Protección y grupo Dina. Muchas de estas junto con el proyecto de conversión a GNL de la empresa E.A.U.P.C.M. y *E.P.G.L.C.* —Una Empresa Procesadora de Gases "L.C."—

En la actualidad circulan 180 auto patrullas Cavalier bi-combustible del GDF y algunos microbuses en la ZMCM. En todo el país se estima que circulan 1,977 vehículos a GN: 480 camiones recolectores de basura, 1,317 camionetas, microbuses o taxis y 180 montacargas.

De acuerdo al Programa del gas natural del GDF en 1998 se introdujeron 180 patrullas bi-combustible y se licitaron 126 patrullas, pickups, colectores de basura y "ligeros"; en 1999 se convirtieron 370 patrullas, jeeps, microbuses, vagonetas y



vehículos utilitarios y se convirtieron 480 unidades colectores de basura a diesel - GNC; para junio del 2000 arrancó el programa de GN en el transporte de pasajeros, con 250 autobuses.

4.1.2. Descripción del proyecto de una Empresa de Autotransportes Urbanos de Pasajeros de la Ciudad de México “Proyecto piloto: aplicación de gas natural licuado (GNL) en vehículos de uso intensivo”.

Antecedentes

Considerando que la contaminación atmosférica en la ZMCM es originada en su mayoría por el transporte de uso intensivo y que en la fecha de elaboración de este proyecto, la E.A.U.P.C.M contaba con cerca de 4,000 camiones dedicados al transporte de pasajeros y, con los antecedentes sobre las experiencias realizadas en combustibles alternos con las que contaba –mezclas gas natural/diesel, GLP, GNC–, esta empresa junto con la E.P.G.L.C., Natural Gas de México y el GDF, decidió elaborar un proyecto para la sustitución al combustible alternativo gas natural licuado –GNL– en sus vehículos.

Se elaboró un proyecto piloto que comprendería la conversión de unas pocas unidades hasta obtener resultados que pudieran determinar si era conveniente la conversión de la flota completa.

Adicionalmente a los vehículos de la E.A.U.P.C.M se efectuaron pruebas con varios vehículos prototipos a GN de diferentes flotillas como Bimbo, DINA, E.P.G.L.C., Dirección de Ecología del Gobierno del Estado de México y un vehículo del GDF. Cabe destacar que en estos vehículos se obtuvieron excelentes resultados en reducción de emisiones y rendimiento del combustible.



Elección de los participantes

Algunos de los pasos principales del proyecto piloto "Aplicación de gas natural licuado en vehículos de uso intensivo" de la empresa actualmente desaparecida E.A.U.P.C.M fueron la búsqueda de una compañía capaz de abastecer el GNL, proporcionar la asesoría técnica requerida para su empleo y proporcionar eventualmente un proyecto integral de abasto del GNL, la construcción de una planta piloto licuefactora de GN, la puesta en funcionamiento de los motores dedicados a GN en los que se efectuaría la prueba y el seguimiento sobre el desempeño en ruta de los autobuses convertidos.

En la elaboración del proyecto piloto se tuvieron en cuenta una variedad de aspectos siendo las expectativas planteadas una muestra de la imagen generalizada sobre la conveniencia del empleo del GN como combustible. Se pueden percibir las altas expectativas que motivaron a los responsables del proyecto por parte de E.A.U.P.C.M y E.P.G.L.C. de México.

Beneficios esperados

Como parte de los aspectos económicos y los beneficios que se esperarían con el uso del GNL en los autobuses se encontraron los siguientes:

- La reducción en emisiones contaminantes por el simple hecho de cambiar a un combustible más limpio que no emite partículas y que traería como consecuencia una mejora substancial en la imagen pública de Autotransportes Urbanos de Pasajeros E.A.U.P.C.M.
- Dado que el gas natural licuado no emite partículas, no se haría necesario el uso de filtros en los escapes, reduciendo los gastos de operación de los vehículos.
- El gas natural licuado es un combustible limpio, por lo que la frecuencia de los cambios de aceite se reduciría en términos de los kilómetros recorridos, es decir, ahora podrían recorrer más kilómetros antes de cambiar el aceite.



- Dada la composición constante del gas natural licuado, la optimización en la afinación del autobús permitiría tener las emisiones más bajas en un nivel constante.
- La densidad energética del gas natural licuado es la mayor de todos los combustibles alternos permitiendo un rango de autonomía mayor. Esto reduciría la pérdida de tiempo en la carga de combustible dándole una mayor utilización real al autobús.

La cuantificación de los puntos anteriores se haría en base a los resultados de las pruebas a efectuarse en los autobuses prototipos.

Se proyectó finalmente que a la conclusión de las pruebas se haría la evaluación del rendimiento del gas natural licuado y su beneficio técnico - económico.

Funcionamiento

Los aspectos operativos en el proyecto por parte de E.A.U.P.C.M se establecieron en cuanto al funcionamiento del Programa de Uso y Abasto de Gas Natural Licuado.

Los vehículos se abastecerían de gas natural licuado en la planta propiedad de E.P.G.L.C. de México, S.A. de C.V. ubicada en el módulo de Control Ambiental de la entonces empresa E.A.U.P.C.M en el horario establecido en el "anexo de Reglas a seguir" que formó parte del Contrato de Comodato entre E.A.U.P.C.M y E.P.G.L.C. de México.

Pruebas a realizar

Adicionalmente al protocolo completo de pruebas operativas que realizaban normalmente en E.A.U.P.C.M a través de su departamento de Control Ambiental, los parámetros que se le hubieron de medir a los vehículos fueron los siguientes:



En cuanto a emisiones: CO, HC, CO₂, NOx; los kilómetros recorridos y, el consumo de combustible.

Datos técnicos

Dentro de los aspectos técnicos se consideró que los equipos a utilizarse en los dos autobuses propiedad de E.A.U.P.C.M fueran los siguientes:

UNIDAD # 1:

Motor marca: Hercules Tipo: GTA-5.6 Capacidad: 190 HP

Sistema de inyección de combustible: Marca: GFI Dedicado a GNL Tipo: Lean Burn

Tanques de combustible: Marca: MVE Tamaño: 80 gal

UNIDAD # 2:

Motor marca: Cummins Tipo: L-10 Capacidad: 240 HP

Sistema de inyección de combustible: Marca: Cummins Dedicado a GNL Tipo: Lean Burn

Tanques de combustible: Marca: MVE Tamaño: 80 gal

Adicionalmente se contaría con los servicios del personal del GRUPO T.M. quién era el representante de la compañía Hercules Engine Company en México, con personal técnico de Cummins de México para atender los motores y con los técnicos de E.P.G.L.C. de México para atender la carga del combustible, tanques y control de la prueba.

Protocolo de prueba para el abasto de GNL

Se transcribe aquí una parte del Contrato de Comodato, mencionado anteriormente entre E.A.U.P.C.M. y E.P.G.L.C.; en este anexo al contrato se



establecieron las reglas a seguir en el abasto de GNL a los vehículos del Proyecto Piloto. “...

1. De acuerdo al contrato de referencia, la planta de gas natural licuado propiedad de E.P.G.L.C. de México, podrá suministrarse el combustible necesario a los vehículos del programa de uso y abasto de GNL.
2. Los vehículos que participarán inicialmente en el programa serán de acuerdo a la lista siguiente, en donde se describe la capacidad de cada tanque criogénico por vehículo:

Tabla 24
Empresas participantes

Placas	Vehículo	Motor	Cap. tanque	Empresa
34-112	Autobús boxer	Hercules	80 gal	E.A.U.P.C.M
Prototipo	Camión DINA	Hercules	50 gal	DINA
Prototipo	Camioneta Ford	Ford	30 gal	E.P.G.L.C.
	Camioneta Ford	Ford	30 gal	E.P.G.L.C.
	Camioneta combi	Volkswagen	30 gal	GDF Dirección de Ecología
	Camioneta Ford	Ford	30 gal	Edo. Mex. Dir. de Ecología
	Panel Ford	Ford	30 gal	Bimbo
	Camión Ford	Hercules	50 gal	PEPSICO grupo embotellador metropolitano.

Asimismo se menciona que la responsabilidad de uso y manejo de vehículos que carguen será estrictamente de la empresa propietaria del vehículo, quedando el organismo ajeno a cualquier situación de riesgo que se pudiera presentar y relevado de toda responsabilidad

3. Se ha acordado que el horario de abastecimiento del combustible se sujete al horario establecido en el organismo y que son como se describe:
Lunes, martes, miércoles y viernes de 8:30 a 18:30
Jueves no se despacha combustible



Sábado de 8:30 a 14:00

4. La empresa deberá presentar copia de su póliza de seguro de daños, así como cada entidad, propietaria de cada uno de los vehículos participantes en el programa piloto de uso y abasto de GNL.
5. Los daños que se pudieran presentar dentro de las instalaciones del organismo deberán correr a cargo de la empresa propietaria de los vehículos, siguiendo los lineamientos marcados por las aseguradoras.
6. Los operadores de los vehículos por ningún motivo podrán pasar a las áreas de trabajo del organismo.
7. En caso de descompostura o falla de vehículos pertenecientes al programa, avisarán a las áreas correspondientes del organismo, estimando el tiempo de permanencia requerido en el inmueble.
8. El organismo y la empresa podrán facilitar los medios de comunicación a su alcance (teléfono, fax) a fin de agilizar la solución a las fallas de los vehículos.
9. El organismo será ajeno a los resultados independientes de cada prueba piloto en los vehículos participantes. ...”

Desarrollo cronológico del proyecto

Algunas acciones, etapas y documentos específicos determinantes durante el desarrollo del proyecto se mencionan a continuación junto con su fecha de realización de forma que permiten obtener un panorama del desarrollo del proyecto:

Fecha	Documentos Determinantes
2 de octubre de 1992	Se recibe la cotización por la caracterización de emisiones de dos camiones repotenciados a GNL por parte del Southwest Research Institute de San Antonio, Texas, EUA, por un monto de 24,800.00 USD junto con el contrato para su aceptación por Cryomex.

Fecha	Documentos Determinantes
25 de enero de 1993	La dirección General de E.A.U.P.C.M otorga el permiso para instalar una Planta Piloto de GNL de 300 gal / día a E.P.G.L.C. y brinda la participación de dos de sus unidades en el proyecto.
9 de marzo de 1993	Solicitud a la delegación Azcapotzalco para iniciar los trabajos de construcción de la Planta Piloto de GNL en el Módulo de E.A.U.P.C.M.
21 de abril de 1993	La Dirección de Gas de SECOFI otorga a CRYOMEX la aprobación para comercializar GNL para carburación en vehículos de combustión interna.
14 de julio de 1993	Se manifiesta que las empresas dentro del proyecto E.A.U.P.C.M - E.P.G.L.C. de México de combustibles alternos son: Detroit Diesel México; E.P.G.L.C. de México, S.A.; Francisco Campos y Asociados (CRYOMEX)
16 de julio de 1993	Se presenta el estudio de Impacto Ambiental en modalidad Análisis de Riesgo.
17 de septiembre de 1993	Resolución de la Dirección de Ecología del DDF que autoriza en materia de impacto ambiental a E.P.G.L.C. de México a realizar su proyecto "Planta Piloto de Licuefacción de Gas Natural" en el Módulo 21 de la ex E.A.U.P.C.M. (* ver la explicación y la descripción de la planta)
20 de septiembre de 1993	Se presenta a la Delegación Azcapotzalco la resolución de Impacto Ambiental de la dirección de Ecología del DDF.
24 de septiembre de 1993	Se presenta el proyecto de GNL y su autorización a la Dirección de Normatividad y Reordenamiento Urbano del Estado de México para incluir su participación con una unidad vehicular.
14 octubre de 1993	Se presenta el Convenio para la Operación de las Instalaciones de la Planta de GNL.



Fecha	Documentos Determinantes
26 de octubre de 1993	Se solicita la documentación de acreditación de la propiedad del inmueble de E.A.U.P.C.M –modulo 21– para proseguir los trámites de autorización por parte de la Delegación Azcapotzalco para la instalación de la planta licuefactora de GNL.
8 de noviembre de 1993	Se firma el Convenio Provisional para la operación de las instalaciones de la Planta de GNL en el módulo 21 de E.A.U.P.C.M entre E.P.G.L.C. de México y la SECOFI.
11 de noviembre de 1993	La secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI) autoriza el Convenio para la Operación de las Instalaciones de la Planta de GNL.
18 de noviembre de 1993	Se presenta a la Dirección de Ecología del DDF el Programa de Prevención de Accidentes para la Planta de GNL.
29 de noviembre de 1993	Reporte de la E.P.G.L.C. a la E.A.U.P.C.M donde se informa que la planta piloto es técnicamente terminada a finales de noviembre y que las pruebas de funcionamiento comenzarían la primera semana de diciembre contando con la posible inauguración en enero.
30 de noviembre de 1993	Presentación por parte de E.P.G.L.C. del Informe del Proyecto de GNL, realizado en colaboración con E.A.U.P.C.M y la Dirección de Ecología del DDF, a la Directora de Desarrollo Urbano del DDF para obtener la constancia de uso de suelo.
16 de diciembre de 1993	E.P.G.L.C. manifiesta la finalización técnica del Proyecto de GNL y la espera de la constancia de Uso de Suelo de la Dirección de Reordenamiento Urbano para obtener la Licencia de Funcionamiento e iniciar las operaciones de a planta piloto. (* Se enumera la documentación que se poseía a esa fecha)



Fecha	Documentos Determinantes
7 de febrero de 1994 Folio 2109	El entonces DDF por medio de su Coord. Gral. De Reordenación Urbana y Protección Ecológica otorga la Acreditación del uso del suelo por derechos adquiridos en el local ubicado en Palestina 170 Col. Clavería, Delegación Azcapotzalco bajo la Cuenta predial 44 238 01 000 donde el Uso del suelo acreditado es para una estación de suministro de GNL para combustión Industrial y Automotriz con una superficie de 300m ²
Marzo de 1994	En el seguimiento efectuado por E.A.U.P.C.M se manifestaron las acciones tomadas en el marco del proyecto de combustibles alternos. (*** Incluyendo otros proyectos)
31 de mayo de 1994	La E.P.G.L.C. informa a la E.A.U.P.C.M que el 26 de mayo el Departamento de Distrito Federal autoriza la operación de la planta piloto de GNL.
Junio de 1994	La E.P.G.L.C. finaliza los trabajos de construcción y puesta en operación de la Planta Piloto de GNL de 300 gal / día.
Julio de 1994	Se reporta que se tiene disponibilidad de GNL para la realización de las pruebas piloto en los autobuses de E.A.U.P.C.M y en los vehículos participantes.
19 de septiembre de 1994	La E.A.U.P.C.M reporta que se inició el análisis del comportamiento del autobús tipo Boxer con número 34-112 con motor Hercules a GN modelo GTA 5.6 con una potencia nominal de 190 H.P. el 9 de Agosto de 1994. Entre otros resultados, la potencia con carga máxima es de 100 HP
30 de septiembre de 1994	Reporte de la E.A.U.P.C.M informando que la planta de GNL está lista para operar y que en ese momento no se hallaba funcionando ya que la Secretaría del Trabajo estaba realizando inspecciones.



Fecha	Documentos Determinantes
5 de octubre de 1994	Notificación de la Dirección de Ecología a la E.A.U.P.C.M informando de la excención del programa "Hoy no circula" por usar GN. Duración de la excención 1 año (5 octubre 1994 al 5 de octubre 1995)
4 de noviembre de 1994	La Secretaria Gral. De Gobierno, Dirección Gral. De Protección Civil informa a la Dirección de Admon. Del uso del suelo y reserva territorial de la CGRUPE la aprobación para la operación de la planta piloto después de haber presentado estudio de riesgos y elaborar el programa para la prevención de accidentes.
24 de noviembre de 1994	La E.A.U.P.C.M reporta el comportamiento en ruta de la unidad impulsada a GN entre el 19 de Septiembre y el 22 de Noviembre de 1994 con los valores para kilometraje, consumo de GN y medición de emisiones. Se destacan fallas eléctricas y poco interés del proveedor del motor para corregir prontamente las fallas.
15 de febrero de 1995	E.P.G.L.C. reporta las acciones que hubo de tomar con respecto al autobús recibido por parte de E.A.U.P.C.M, su conversión a GN, sus múltiples fallas posteriores y los acuerdos tomados para lograr el desempeño adecuado de la unidad.
20 de febrero de 1995	Se reporta que los vehículos prototipo a GNL de otras flotillas a esta fecha son: un vehículo de Bimbo con motor GM y equipo de carburación IMPCO, un camión de carga tipo estaquitas de Dina con motor Hercules GTA-5.6, dos vehículos utilitarios de E.P.G.L.C. motor Ford y equipo de carburación IMPCO, un vehículo utilitario de la Dirección de Ecología del gobierno del Estado de México y un Vehículo utilitario del DDF.



Fecha	Documentos Determinantes
28 de febrero de 1995	Informe de la E.P.G.L.C. a Grupo TM notificando del Contrato entre E.P.G.L.C. y E.A.U.P.C.M. "Desarrollo de tecnología para implementar el uso de GNL"
23 de marzo de 1995	La E.A.U.P.C.M reporta el comportamiento de la unidad impulsada a GNL entre el 1 de Marzo de 1995 y el 23 de Marzo de 1995, el kilometraje recorrido, el combustible consumido y las pruebas mecánicas que se le realizaron.
11 de mayo de 1995	La Secretaría del Medio Ambiente informa a la E.A.U.P.C.M que de Mayo 22 a 25, en el "Foro sobre sustentabilidad de la Ciudad y manejo de la cuenca atmosférica del Valle de México", se realiza la presentación del autobús de E.A.U.P.C.M que emplea GNL.
18 de septiembre de 1995	E.A.U.P.C.M reporta los resultados después de siete meses de pruebas con el autobús impulsado a GN en el Módulo 24, "entregando un rendimiento con pasaje en tráfico de 1.225 km / L." Se solicita a E.P.G.L.C. de México un perfil completo de desarrollo incluyendo conceptos económicos, ecológicos, operativos y técnicos.
	Se suspende el proyecto por la quiebra de la E.A.U.P.C.M.
Febrero de 1998	Se desarma la planta licuefactora piloto.

* Dentro de la resolución del 17 de septiembre de 1993 hacia E.P.G.L.C. de México por parte de la Dirección de Ecología del DDF –ahora GDF– se manifiesta la aprobación antes descrita con las siguientes condicionantes:

A.- Es una aprobación intransferible a favor de E.P.G.L.C. para ubicar en el módulo 21 de E.A.U.P.C.M una planta piloto de licuefacción de gas natural con una capacidad de 1,135.5 L / día (300 galones) a -161.9 °C y baja presión para el abasto de 16 unidades diariamente en una superficie de 300 m².



B.- Las actividades consisten en la recepción, licuefacción suministro y venta de GN para carburación a través de la construcción y operación de las siguientes obras:

Caseta de regulación y medición de GN.

Equipo paquete de secado con secador de malla molecular marca Kryopac con capacidad de $37.44 \text{ m}^3 / \text{h}$, presión de operación de $4.5 \text{ kg} / \text{cm}^2$ manométrica y temperatura de operación de $37.8 \text{ }^\circ\text{C}$.

Licuefactor de GN tipo serpentín inundado marca Kryopac con capacidad de $1,135.5 \text{ L} / \text{día}$ de GNL con presión y temperatura de operación de $3.95 \text{ kg} / \text{cm}^2$ manométrica y $-147 \text{ }^\circ\text{C}$ con nitrógeno líquido como medio de condensación.

Recipiente horizontal de almacenamiento de nitrógeno líquido de doble pared, la chaqueta de acero al carbón y el recipiente interno de acero inoxidable con capacidad de $18,800 \text{ L}$, peso lleno de 26.6 Ton , presión de operación de $4.5 \text{ kg} / \text{cm}^2$, presión de diseño de $18.61 \text{ kg} / \text{cm}^2$ absoluta y temperatura de operación de $-195.8 \text{ }^\circ\text{C}$.

Recipiente vertical de almacenamiento de GNL de doble pared, exterior de acero al carbón e interior de acero inoxidable, con capacidad de $11,350 \text{ L}$ peso lleno de 12.83 Ton con temperatura de diseño de $-195.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y presión hidrostática de $27.9 \text{ kg} / \text{cm}^2$.

Dos recipientes verticales abastecedores de GNL con capacidad de $1,137 \text{ L}$ y con peso lleno de 1.362 Ton cada uno con presión de diseño de $16.5 \text{ kg} / \text{cm}^2$ fabricados de acero inoxidable.

Un quemador y, Un compresor.

C.- La presentación de los siguientes documentos:

Reporte sobre auditorías de seguridad en las instalaciones y reporte de acciones tomadas como consecuencia de la anterior.

Programa para prevención de accidentes en las instalaciones.



Programa contra incendios donde se incluyan todas las áreas autorizadas.

Programa Integral de Mantenimiento Preventivo y Correctivo.

Programa integral de medidas de Seguridad

Programa calendarizado sobre cursos de capacitación en seguridad para el personal que labore en la planta.

Reporte Anual de accidentes incapacitantes así como de repercusiones severas señalando causas, efectos y acciones correctivas tomadas.

D.- Queda sujeta a disposiciones de carácter técnico sobre: Recipientes, Despachadores, Tuberías y Válvulas y, Planta en General.

La resolución cuenta con una validez de 365 días a partir de su recepción.

Junto con la resolución favorable se recibió la opinión técnica de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) a fin de unificar criterios en cuanto a las modificaciones ambientales que pudiera generar el desarrollo del proyecto.

** La documentación obtenida y acciones realizadas al 16 de septiembre de 1995 por E.P.G.L.C. incluye, además de las constancias ya mencionadas que le conciernen, las Cartas de Participación e Intención de las principales flotillas y armadoras del transporte pesado en la ZMCM en el Proyecto de GNL, así como cursos de capacitación para prevenir accidentes de líquidos criogénicos con participación de bomberos de la Delegación Azcapotzalco y de E.A.U.P.C.M y Minutas de las juntas de trabajo para la elaboración de la Norma Mexicana de GNL con participación de autoridades del DDF, SECOFI y del Estado de México. Cabe mencionar que en la evaluación de la Planta Piloto de GNL participaron todas las dependencias que tenían atribución en la materia, tales como SEDESOL, SECOFI, IMP, PEMEX, Dirección de Ecología del DDF y la Delegación Azcapotzalco por lo que se puede afirmar que la Planta Piloto cumplió con todas



las normas de seguridad, operación y riesgo ambiental exigidas por las autoridades competentes.

*** Entre los puntos relevantes destacan:

El empleo de GLP en E.A.U.P.C.M se abandonó porque se le encontraron serios inconvenientes. Se decidió probar el GN en forma licuada y comprimida.

Se facilitó un autobús a Detroit Diesel de México para el montaje de un motor 6V-92 a GNC. La instalación fue completada pero se encontraba en proceso de correcciones para obtener el certificado de seguridad e iniciar las pruebas.

Se asignaron dos autobuses a la empresa Francisco Campos y Asociados para pruebas piloto con GNL; no se habían iniciado porque no contaban con los permisos de utilización de la planta, mismos que tramitaría esta empresa.

Se facilitó un autobús a E.P.G.L.C. de México quien le instaló un motor dedicado a GNL marca Hercules.

Se manifiesta finalmente que con el Proyecto de Combustibles Alternos en marcha la implementación dependería de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas y de acuerdo a los estudios de viabilidad basado en aspectos técnicos como la potencia, las emisiones, la disponibilidad de combustible, los costos derivados, la seguridad de autobuses e instalaciones y la aceptación de los usuarios.

Se hace constar también que de todas las empresas contactadas, incluyendo algunas en EUA y Canadá, sólo dos mostraron el interés esperado en el proyecto: Francisco Campos y Asociados y E.P.G.L.C. de México al ser las únicas capaces de presentar un proyecto integral.

Informe del costo estimado para la conversión

El informe que se presentó para el Costo Estimado de la Infraestructura Requerida para Implementar el Uso de Gas Natural en el Transporte Urbano de Pasajeros arrojaba:

Numero de autobuses totales: 5,000

Consideraciones de uso de GN: 1,500 repotenciados ^(a), 3,500 nuevos.

Tipo de autobuses: 9 y 12 metros de largo.

Tipo de Combustible: GNL o GNC

Tiempo de ejecución del proyecto: 5 años.

Costo del programa de conversión

	Usando GNL			Usando GNC		
	No.	Unitario	Total	No.	Unitario	Total
Infraestructura						
Estaciones de llenado ^(b)	22	1,050	23,100	62	1,750	108,500
Plantas de Producción ^(c)	3	28,000	84,000			
Subtotal por la infraestructura			107,100			108,500
Autobuses a gas natural						
Autobuses repotenciados de 12 m ^(d)	750	40	30,000	-	-	-
Autobuses repotenciados de 9 m ^(e)	750	30	22,500	-	-	-
Sustitución de autobuses de 9 m ^(f)	1,500	72	108,000	2,500	80	200,000
Sustitución de autobuses de 12 m ^(g)	2,000	82	164,000	2,500	90,	225,000
Subtotal por los 5,000 autobuses			324,500			425,000
Costo total del programa			431,000			533,500

Notas:

{a}: De los 2,600 autobuses activos de E.A.U.P.C.M se consideró que solamente 1,500 pueden ser repotenciados y 1,100 ya no es conveniente por quedarles poco tiempo de vida útil.



{b}: Las estaciones de llenado de GNL serían duales, es decir, tendrían la capacidad de suministrar tanto GNL como GNC de alta pureza. Para el GNC se consideraron estaciones de llenado de 2,000 m³ / h.

{c}: Las plantas de GNL producirían este combustible con una pureza de 99.5% de metano, lo cual cumple con los requerimientos de los fabricantes sobre la pureza del GN que requieren sus motores. Esto garantiza el funcionamiento óptimo de los motores dedicados a GN y mantiene las emisiones contaminantes estables en el nivel mínimo.

{d}: Para el estimado se consideraron motores dedicados a GN de 250 HP Cummins o Detroit Diesel. Se consideró para los motores, un precio de 25,000 USD incluyendo aranceles de importación y costos de transporte. Se deberá negociar el precio final con los fabricantes de motores.

{e}: Para el estimado se consideraron motores dedicados a GN de 190 HP Cummins o Detroit Diesel. Se consideró para los motores, un precio de 15,000 USD incluyendo aranceles de importación y costos de transporte. Se deberá negociar el precio final con los fabricantes de motores.

{f}: El costo adicional de los autobuses a GNC se debe al costo de los cilindros de almacenamiento necesarios para darles la autonomía que estos requieren. Se consideraron 15 cilindros de 7 galones de capacidad con un costo total de 15,000 USD. Esto incluye válvulas, boquillas de llenado, soportes, tubería y mangueras de alta presión, etc.

4.1.3. Reporte de avances de E.P.G.L.C. de México (1993)

Por parte de la Empresa Procesadora de Gases L.C. (E.P.G.L.C. de México –que fue el resultado de la fusión de las empresas Natural Gas de México y de Distribuidora Mexicana de Criogénicos– que fue la compañía licuefactora de gas natural, fue elaborado un reporte en septiembre de 1993 consistente en ocho secciones en donde se describieron en términos generales las acciones realizadas



por esta empresa (en conjunto con el proyecto de la E.A.U.P.C.M) para el abasto de GNL, así como sus expectativas de crecimiento y adquisición de mercado.

Introducción

La primera sección, que correspondió a la "Introducción", consideraba como datos relevantes a la magnitud de la población en México, en esa fecha más de 90 millones de habitantes, concentrada la población y las actividades productivas y comerciales en 3 áreas principales en el país: Monterrey, Guadalajara y ZMCM; y, la población en la ZMCM de más de 20 millones de habitantes y la existencia de más de 3.7 millones de vehículos. *{En la fecha de elaboración}*.

De acuerdo a la apreciación particular de esta compañía en la que enfatizan la importancia del documento "Clean Air Act" de los EUA y a la falta de este o su equivalente en nuestro país se reconoce que "el gobierno está involucrado constantemente en esfuerzos para combatir la contaminación" agregando que, por ejemplo en 1990 se implementó el programa "Hoy no circula".

También fueron consideradas las emisiones de contaminantes en la ZMCM -76% correspondiente a vehículos a motor, 4% a la producción de energía, 5% a la industria y 15% a causas naturales- *{De acuerdo a datos oficiales}*, y, la distribución de los transportes en la ZMCM -vehículos 45%, camiones 28%, autobuses de tránsito 25%, otros 2%, para totalizar 3,700,000 vehículos- para el desarrollo de este proyecto de GNL.

Se encuentra mencionada la pertenencia de la compañía licuefactora a la Asociación Mexicana de Gas Natural, reconociendo a esta como participante activa de la promoción en el empleo del GN y determinante en la elaboración de normas para el manejo de GN en México.



Planta Piloto

La segunda sección correspondiente "Planta Piloto" describía que como una parte de su "programa para promover el uso del GNL", fue instalada una planta de GNL que se encontraba operando en ese momento con una capacidad nominal de 300 galones al día, aclarando que la planta piloto fue construida cumpliendo con las regulaciones internacionales de seguridad en diseño, construcción y operación con el soporte de la empresa licuefactora y el del departamento de ingeniería de Chicago Bridge on Iron.

Las instalaciones de la planta licuefactora piloto se encontraban localizadas en un módulo —el 21— de la E.A.U.P.C.M, al que consideraban el más importante cliente potencial debido al hecho de que poseía más de 4000 vehículos trabajando en la ciudad.

Para comenzar las operaciones de esta planta piloto fue necesario que la compañía licuefactora cumpliera con muchos requerimientos marcados por las autoridades, donde varias veces fueron ellos los que establecieron los contenidos de acuerdo a los estándares internacionales debido a que no había precedentes en México para seguir.

Estos documentos y permisos fueron:

- análisis de riesgos medio ambiental
- programas de prevención de accidentes para el DDF- SEDESOL
- consentimiento de la secretaria de comercio SECOFI
- reporte de los expertos en gas (SECOFI)
- aprobación de PEMEX
- certificación de uso del suelo (DDF)
- aprobación del departamento del trabajo (STPS)



- aprobación del departamento de bomberos
- aprobación E.A.U.P.C.M
- permiso de operación del DDF

Se incluyó una mención al entrenamiento que se dio a los bomberos del DDF en Brian, Texas Fire Training School para manejar problemas con GNL en septiembre 24 de 1993. Con la aclaración de que el sistema de seguridad en la planta piloto estaba orientado para prevenir cualquier incidente independientemente de tener además en el lugar todos los implementos para manejar accidentes mayores.

Como ejemplo de las medidas de seguridad para la disminución del riesgo se pueden mencionar los primeros puntos de la "lista de verificación" que el operador de la planta había de seguir para el reabasto de un vehículo con GNL:

"Instrucciones para el llenado de vehículos con GNL:

1. apagar el motor y cualquier aparato eléctrico
2. asegurar los neumáticos con calzas
3. entregar las llaves del vehículo al operador de la planta
4. poner a tierra en vehículo
5. utilice siempre el equipo de seguridad durante la operación de llenado
6. verifique que no existan puntos de ignición"

El programa piloto contemplaba 16 unidades con recargas regulares. Inicialmente estaban contempladas todas para ser convertidas a GNL, pero debido a su alto costo y a la reticencia de ciertos gerentes de flotillas se decidió retrasar el programa hasta tener unidades a GNL dedicadas de origen. Las unidades susceptibles de conversión se distribuían como se muestra a continuación:

Unidades susceptibles de conversión

Compañía	Tipo de motor	Total de unidades de la flotilla
Pepsi	Hercules 190 IMPCO	2000
Telmex	IMPCO	4300
PEMEX	IMPCO	No Disponible
E.P.G.L.C.	IMPCO Hercules 190 Hercules 190	
E.A.U.P.C.M	Hercules 190 Hercules 190	4000
DINA	Hercules 190 Cummins L-10	Sin flotilla
DDF	IMPCO	6500
Edo. De Méx.	IMPCO	2000
Bimbo	Hercules 190 Refabricado	3000

Las corridas de prueba efectuadas hasta el momento de realización del reporte en dos vehículos con motores Hercules dedicados a GNL habían resultado satisfactorias y altamente prometedoras.

Una de estas corridas fue hecha en un autobús de E.A.U.P.C.M en la Cd. de México, a una altitud de más de 7 mil pies (2000 m) sobre el nivel del mar donde no es fácil de obtener una combustión óptima.

Vehículos y Mercado

En el tercer punto "Vehículos y Mercado" se incluyeron algunos elementos de análisis que fueron considerados para determinar el mercado potencial:

Se reportó esta tabla que muestra las diez principales flotillas en la ciudad de México en esa fecha; algunas de ellas comenzaron programas de conversión a GLP para ser excluidas del programa hoy no circula:

Principales flotillas en la ZMCM

Compañías	No. De vehículos
Municipal DDF	6500
Telmex	4300
E.A.U.P.C.M	4000
Bimbo	3000
Sabritas	2000
Pepsico	2000
Edo. Méx.	2000
Gamesa	1400
Televisa	800
Servicio Panamericano	700

Sin embargo no había experiencia en el manejo de GLP para uso vehicular. Además se comenzó sin cumplir los requerimientos apropiados de seguridad, esto causó muchos accidentes y no siempre se obtuvo la reducción de la contaminación.

Hasta esa fecha había tres opciones en México para unidades operando con GNL (Hercules, Cummins, y Detroit Diesel). Uno de estos fabricantes como Hercules Engine Co estaba muy entusiasmado con el proyecto de la compañía licuefactora y por eso se contó con su apoyo en el desarrollo del proyecto de GNL.

Los kits de conversión a GN disponibles en México eran: GFI, IMPCO.

Las unidades refabricadas disponibles en México eran de: Vege de México, SRC (Springfield Remanufacturing Co.)

Se realizaron alianzas estratégicas para promover el uso del GNL en México, como muestra:

MVE Cryogenics

DINA

IMPCO

Hercules



Competidores

En el cuarto punto "Competidores" se incluyó el resultado para el estudio del Mercado para Vehículos Alternativos:

Pero la falta de una guía precisa por parte de las autoridades y la falta de un equivalente a la Clean Air Act estimaban que habían contribuido a desorganizar la competencia en el mercado en la ZMCM. Como ejemplo, el GLP comenzó sin una estructura específica de precios causando un mercado negro con el GLP para el consumo doméstico.

Mercado para vehículos alternativos:

D.F.	2,709,000
Nuevo León	452,000
Jalisco	654,000
Edo. de Méx.	979,000
Resto del País	5,596,000

Considerando el GNC, en esa fecha sólo había una estación de llenado en operación en Monterrey que solamente alimentaba a la flotilla privada de la compañía licuefactora.

No había estaciones de GNC funcionando en la Cd. de México; La que fue construida con la participación de Transful Inc. y grupo Havre nunca había sido capaz de operar porque no poseía los permisos necesarios.

Esta es una tabla comparativa de los diferentes precios de combustible en México en la fecha de realización del proyecto, ilustrando las diferencias de precios entre varios combustibles.

Precios de los combustibles*

Nombre comercial	Nombre EUA	USD / gal equivalente
Gasolina nova	Con plomo regular	1.40
Gasolina magna	Sin plomo	1.48
Diesel		1.04
Diesel sin	Con menos del 0.5 de azufre	1.29
GLP		1.175
GNC		1.01
GNL		1.37

* Precios en el programa piloto.

Inversión y Organización

En el quinto punto "Inversión y Organización" se elaboró un recuento de las cantidades invertidas hasta la fecha. Esta es una cantidad económica considerable que demuestra el interés por parte de la compañía de establecer un nicho de mercado y la factibilidad del proyecto desde una perspectiva de inversión extranjera.

Hasta ese momento habían sido realizadas las siguientes inversiones, especialmente en ingeniería, diseño y construcción de la planta piloto, así como en equipo complementario y entrenamiento para el personal involucrado en ese programa.

Suma de inversión hasta el 4 de septiembre de 1994

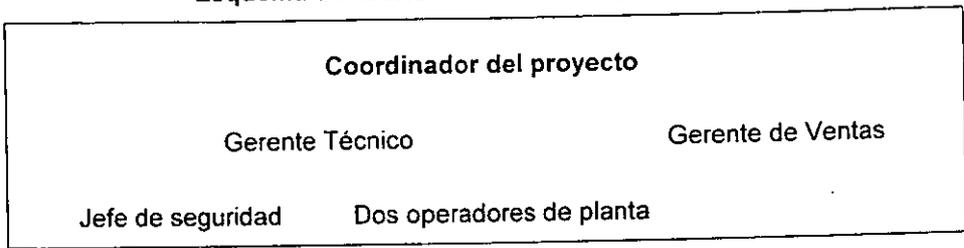
	USD
Tanque criogénico de 3000 gal	70,000
Planta (secadores, licuefactor y otros)	30,000
Estación de llenado	300,000
Sistema de seguridad y supresión de fuego	35,000
Permisos	45,000
Ingeniería	20,000
Obra civil	150,000
Tanques onboard (sólo para trabajos importantes)	20,000
Gastos de motores dedicados y conversiones para el programa piloto	20,000
TOTAL	700,000

[E.P.G.L.C. LNG México]



El proyecto piloto estaba manejado por un pequeño grupo con el apoyo de la corporación licuefactora cuando era necesario.

Esquema de funcionamiento de la planta piloto



Situación Legal

El sexto punto "Situación Legal" manifestó la condición legal de las autoridades de la compañía, con énfasis sobre algunas fechas importantes en las que fueron otorgados permisos y certificación legal para la operación de la planta licuefactora en la ZMCM.

Debido a las restricciones legales para el manejo del GN en México, el 16 de diciembre de 1993 la comisión de inversión extranjera dio un permiso a industria CBI y sus subsidiarias para construir una planta de GNL y estación de llenado, producir, comercializar y distribuir GNL; con esta autorización fueron iniciadas otras acciones complementarias para el proyecto

El 14 de septiembre de 1994 las dos compañías que habían estado manejando GNL en México: Liquid Natural Gas de México y Distribuidora Mexicana de Criogénicos, fueron formalmente incorporadas, ambas manejadas por Liquid Carbonic LNG International Incorporated.



Próximos Pasos

En el séptimo punto "Próximos Pasos" se tomaron en cuenta las siguientes acciones a realizar por parte de la compañía para garantizar el abasto y posteriormente aumentar su producción, tales como:

La adquisición del terreno para la futura planta industrial cercana a la ciudad de México en un área que pudiera recibir fácilmente materias primas y servicios como GN, nitrógeno líquido, agua y permiso de uso del suelo. –La planta licuefactora funcionaba por el principio de transferencia de calor a un refrigerante, nitrógeno líquido, para efectuar el enfriamiento.–

Llevar la planta piloto a su máxima capacidad e incluso duplicar su capacidad de licuefacción mientras nuestras necesidades futuras son definidas de acuerdo a la respuesta del mercado.

Tener la opción de importar temporalmente GNL de la planta en Willis Texas propiedad de la compañía licuefactora a la ciudad de Monterrey que está localizada a 450 millas de distancia y eventualmente a la Cd. de México cubriendo las 950 millas totales de distancia.

Futuro Cercano

Manifestaron también en el octavo punto "Futuro Cercano" algunos de sus objetivos inmediatos como:

Conseguir y aplicar la "Clean Air Act" para las tres ciudades principales en México –Guadalajara, Monterrey y DF–.

Terminar el estudio de factibilidad para comenzar la instalación de una planta industrial capaz de producir 20,000 gal / diarios.



Formalizar los contratos de abasto con los clientes potenciales después de terminar satisfactoriamente el periodo de prueba que ya se encontraba en marcha (E.A.U.P.C.M, Pepsi, Gemex, DINA, DDF, Edo. de Mex., Bimbo, Telmex).

Realización de nuevas inversiones para mantener su posición de liderazgo de la compañía licuefactora y mantener a sus clientes y colaboradores satisfechos, al tiempo de obtener simultáneamente un aire limpio para México.

4.1.4. Desenlace del proyecto para el empleo de GNL

Como se puede apreciar la experiencia en México en el empleo de GNL para automotores de uso pesado es significativa. El proyecto realizado en 1994 era tan claramente conveniente que se logró involucrar a un gran número de empresas y organismos para su realización.

Una vez más para nuestro país, el proyecto fue abandonado perdiendo así la experiencia ganada en las diferentes áreas que fue necesario desarrollar para su realización, por ejemplo:

- Obtención de permisos para el manejo, licuefacción y venta de GN –nunca antes considerados en nuestro país–
- Convenios de colaboración y soporte técnico con compañías extranjeras especializadas en motores a GN
- Experiencia en México en la licuefacción de GN
- La instalación de la primera planta de GNL en Latinoamérica
- Entrenamiento específico de personal para el manejo y abasto de la planta licuefactora
- La experiencia obtenida en el manejo de motores a GNL, a condiciones poco estudiadas de altitud y circulación propias de la ZMCM, etc.



El hecho de que la compañía de transportación E.A.U.P.C.M. a la que se hace aquí referencia enfrentó una quiebra que alteró el seguimiento de sus proyectos, podría parecer determinante, pero ello no explica el abandono en el seguimiento por parte de todos los participantes.

Como un punto final representativo para este proyecto, que se perfiló como el más completo y mejor realizado hasta el momento en nuestro país, basta mencionar que en febrero de 1999 la planta licuefactora piloto fue desarmada y almacenada.

4.2. Acciones recientes

Para el año 2001 se ha modificado en gran medida la percepción que se solía tener acerca del gas natural.

Ya existen normas oficiales que regulan su pureza, sus instalaciones, su distribución, las instalaciones vehiculares, las estaciones de servicio, su odorización, su transporte, la protección catódica para las tuberías, los requisitos de seguridad para instalaciones vehiculares con GNL, etc.

Algunas de las normas relacionadas con el GN en México

Norma Oficial Mexicana	Título
NOM-001-SECRE-1997	Calidad del gas natural
NOM-002-SECRE-1997	Instalaciones para el aprovechamiento del gas natural
NOM-003-SECRE-1997	Distribución del gas natural
NOM-004-SECRE-1997	Gas natural licuado - Instalaciones vehiculares
NOM-005-SECRE-1997	Gas natural licuado - Estaciones de servicio
NOM-006-SECRE-1998	Odorización del gas natural
NOM-007-SECRE-1998	Transporte de gas natural
NOM-008-SECRE-1998	Protección catódica de tuberías de acero para GN y GLP
NOM-094-SCFI-1994	Uso del GNL como combustible vehicular. Requisitos de seguridad para instalaciones vehiculares.
NOM-CCAT-014-ECOL1993	Niveles máximos permisibles de emisión de gases contaminantes del escape de vehículos con GLP, GN u otros alternos.



Norma Oficial Mexicana	Título
NOM-076-ECOL-1995	Niveles máximos permisibles de emisión de HC no quemados, CO, NOx del escape y HC del sistema de combustible en vehículos a gasolina, GLP, GN u otros de uso pesado. (>3,857 kg)
NOM-042-ECOL-1999	Niveles máximos permisibles de emisión de HC no quemados, CO, NOx y PM del escape y HC del sistema de combustible en vehículos a gasolina, GLP, GN y diesel de uso ligero. (<3,857 kg)
Reglamento del gas natural	Ley reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el ramo del petróleo.

Situación actual en la ZMCM

Se está promoviendo el uso del GN como combustible para los hogares y ya se están realizando una gran cantidad de excavaciones para la colocación de la red de gasoductos en la ZMCM; se tienen además algunas compañías dedicadas a la conversión de vehículos a GN –principalmente microbuses– y ya están disponibles motores de más fabricantes como Ford, General Motors, Chrysler, Volkswagen, Nissan, BMW, Volvo, Renault, Fiat y Honda para los vehículos de uso ligero y Caterpillar, Cummins, Detroit, Hercules, Navistar, Tecogen, John Deer, Fiat, Man, Perkins y Mercedes para vehículos de uso pesado. ^[30]

Empresas en la ZMCM dedicadas a la conversión de vehículos a GN

Empresa	Mercado objetivo
Recsa: GNC	ND
Eco Vehicular	Conversión exclusivamente de microbuses a GNC. ^[8]

Existe un Programa de gas natural en el gobierno del D.F. y se tienen incluso estimaciones sobre la demanda de gas natural comprimido con un programa de Operación de Estaciones de GNC.



Algunas de estas estimaciones fueron: --tomado del GDF--

Estimación de la demanda del gas natural

Año	Tipo y cantidad de vehículos	Consumo de gas natural (litros equivalentes)
1998	1,406 Gubernamentales	29,000
1999	2,000 Gubernamentales 250 autobuses 500 taxis 500 microbuses	85,000
2000	2,500 Gubernamentales 400 autobuses 1,500 Taxis 1,000 microbuses	135,000

Independientemente de los valores proyectados para el crecimiento en el consumo del GN para vehículos en la ZMCM, aparentemente sólo es posible contactar a una empresa que según uno de sus representantes es la única actualmente en el país que realiza conversiones a GN y se encuentra enfocada exclusivamente en la conversión de microbuses a gas natural comprimido y, dadas sus estimaciones, hasta no haber avanzado significativamente en este tipo de conversión, no ampliarán su mercado hacia otros consumidores. Se puede mencionar que para julio del 2001 únicamente había dos estaciones de abastecimiento de GNC en la ZMCM con planes para construir otra para fines del 2001 y dos más en un plazo indeterminado. Este mismo representante de la compañía que realiza las conversiones manifestó desconocer el concepto de gas natural licuado, siendo este desconocimiento acerca del gas natural y específicamente del gas natural licuado la pauta común en el personal dedicado a vehículos de uso intensivo en la ciudad.



☺ 5. Recapitulación y Conclusiones:

Haciendo una revisión general de los puntos tratados se destacan los siguientes:

- La contaminación atmosférica consecuencia de las actividades humanas resulta en perjuicios severos hacia la salud humana y hacia la vida en nuestro planeta.
- La reparación de los daños producidos es cuantificable económicamente, ya sea como gastos o como beneficios perdidos, y resultan en cantidades muy significativas que se podrían evitar.
- En el caso de la ZMCM los estimados alcanzan como cifra conservadora hasta los 2 mil millones de dólares al año. ^[8]
- El empleo de los combustibles tradicionales implica un subempleo de estos porque se destruyen materias primas valiosas, no renovables y limitadas para obtener su energía.
- Las fuentes de energía limpia alternativa no se encuentran suficientemente desarrolladas para satisfacer los requerimientos económicos y de abasto de la actualidad.
- El gas natural representa una opción satisfactoria que permite su empleo como combustible, no implica la pérdida de materia prima compleja, cuenta con vastas reservas probadas y es susceptible de producción.



- Considerando el concepto de Ciclo Completo de Energía, el gas natural resulta ser la fuente energética a corto y mediano plazo más económica, eficiente y con menor impacto ambiental de todas las alternativas disponibles.
- El gas natural es una materia prima y una fuente energética de uso común y consta de una molécula sencilla que permite una gran variedad de aplicaciones y representa beneficios económicos y en seguridad.
- Esta fuente de energía es ampliamente conocida en cuanto a su manejo y propiedades existiendo toda una infraestructura mundial para su transporte, almacenamiento y aprovechamiento.
- Siendo los combustibles vehiculares tradicionales los responsables de una gran parte de la contaminación atmosférica y siendo el gas natural una fuente de energía ideal a corto plazo resalta la posibilidad de emplearlo como fuente de energía para vehículos.
- El gas natural requiere de un ligero y poco costoso proceso para su empleo como combustible vehicular conservando todas sus ventajas de eficiencia, costo y emisiones ambientalmente favorables frente a otras alternativas.
- Existen dos de estos procesos: la compresión y la licuefacción del gas natural; siendo la licuefacción una mejor alternativa al presentar ventajas físicas y económicas en su empleo como combustible resultando en una opción perfectamente factible y segura con medidas mínimas de información y precaución.
- Existe mundialmente un gran desarrollo tecnológico en la fabricación y el empleo de vehículos a gas natural, ya sean convertidos a partir de automotores normales o fabricados de origen a GN, licuado o comprimido. Estos vehículos son tan o más eficientes que los que usan combustibles tradicionales.
- Existen varios procesos para licuar o comprimir el gas natural que abarcan varias aplicaciones, costos y situaciones. Se encuentran disponibles plantas



autoimpulsadas que comprimen o licúan esta fuente de energía en las instalaciones de abastecimiento.

- A nivel mundial existe una amplia experiencia en el empleo y promoción de vehículos a gas natural, siendo esta la tendencia observada en varios países desarrollados o con una preocupación ambiental profunda.

- En México se cuenta con experiencia en el uso de este combustible, pero como es típico, los esfuerzos realizados han sido dispersos en tiempo y jerarquía y no han sido monitoreados sistemáticamente para permitir la integración de toda la experiencia acumulada.

- En la ZMCM se realizó a mediados de los años 90 un proyecto pionero en América Latina que consistía en la construcción de una planta piloto de gas natural licuado para el abasto de algunas unidades a modo de prueba de la, entonces, flota más grande de transportes de uso pesado en la ciudad y en el país.

- En este proyecto fueron involucradas todas las dependencias gubernamentales que pudieran tener alguna participación, así como algunas de las compañías privadas con flotillas más grandes de la ciudad, ya fuera con la aprobación o supervisión de las primeras o con la incorporación de algunos de sus vehículos a la prueba coordinada de las segundas.

- A pesar de la magnitud del proyecto y de haber sido los resultados satisfactorios, de contar con el apoyo de las compañías extranjeras fabricantes de los motores y de la tecnología de la planta licuefactora, de haber forzado la creación de nuevas leyes relativas al gas natural y la obtención de permisos nunca antes considerados para la participación de diversas empresas en el abasto, procesamiento y venta del gas natural así como la compra, mantenimiento y optimización de los vehículos impulsados por este, el proyecto fue detenido y posteriormente olvidado al enfrentar una quiebra uno de los organismos participantes.



- La inversión, conocimiento y experiencia obtenidos han sido relegados al olvido a pesar de que la empresa coordinadora era un órgano descentralizado del gobierno.
- En la actualidad, ocho años después del inicio del proyecto, ha sido retomado el interés por el gas natural como fuente de energía para la ciudad y, especialmente, como combustible vehicular, aún así, existe sólo una empresa dedicada a las conversiones de automotores a GN, específicamente de microbuses a GN comprimido, siendo el desconocimiento de la experiencia ya obtenida años atrás en el manejo y las bondades del GNL la constante entre los involucrados en el proyecto actual de GN como combustible vehicular.

Cabe finalmente destacar dos resultados relevantes de todo el desarrollo aquí realizado:

- El empleo de transportes eléctricos, ya sean automóviles o trenes, –si se mantienen las fuentes de electricidad como hasta ahora– como una alternativa a la contaminación es una respuesta incompleta ya que por cada tres unidades de energía aprovechadas al menos siete se están perdiendo en el proceso y se está generando la contaminación proporcional a la suma de éstas en algún lugar del país.
- La conversión de los vehículos a gas natural es económicamente costeable e inaplazable ya que incluso en el caso de que la ciudadanía hubiese de invertir el dinero para tal efecto mediante subsidio o crédito gubernamental, la recuperación se daría en poco tiempo; obteniendo, además, grandes beneficios de manera prácticamente inmediata en cuanto a erogaciones por salud, productividad u otros rubros.



Conclusiones:

- 1.- La tecnología necesaria para la conversión de vehículos a gas natural existe en el mundo y puede ser adaptada para las condiciones de México y su capital. Esta conversión puede reportar grandes beneficios económicos y en salud pública.
- 2.- Se cuenta en nuestro país con la experiencia necesaria para crear la infraestructura que permita el funcionamiento a gran escala de vehículos a gas natural, sea licuado o comprimido, desde la obtención del energético hasta su empleo final como combustible.
- 3.- La tecnología se encuentra disponible comercialmente y hay en la actualidad empresas –como la citada E.A.U.P.C.M. donde fue desarrollado el proyecto integral descrito en este trabajo– que cuentan con el personal capacitado, las instalaciones y las unidades como para constituir nuevamente un proyecto significativo de conversión a gas natural de los vehículos.
- 4.- El realizar el proyecto de conversión masiva de vehículos a gas natural, ya sea en la totalidad del parque vehicular o sólo en el de uso intensivo, es factible económicamente dado que los beneficios provienen, no sólo de los rubros ambientales y de salud pública, sino del ahorro directo por el precio del combustible, el menor mantenimiento de los vehículos, la disponibilidad doméstica del energético y el ahorro por menores importaciones de otros combustibles; siendo factible adicionalmente la generación de recursos mediante la creación de productos terminados a partir de los derivados de petróleo que no serían destruidos en la combustión.
- 5.- Se tienen además otros beneficios implicados de índole no económica, como imagen pública o calidad de vida, que no son fácilmente cuantificables.



REFERENCIAS

1. Liquid Carbonic LNG. *Tomorrow's fleet fuel is available today*. EUA, 1993, 7 p.
2. López Acuña, Daniel. *La salud ambiental en México*. México, Universo 21, 1987, 244 p.
3. Gaceta UNAM. México, UNAM, 18 de enero de 2001.
4. Chovin & Roussel. *La polución atmosférica*. Barcelona, España, Col. ¿Qué sé?, 1970, 124 p.
5. Leclerc, E. *Contaminación de la atmósfera*. Ginebra, Suiza, OMS, 1962, 476 p.
Y Margulis, Sergio. *Back of the envelope estimates of environmental damage costs in México*. The World Bank, 1994, 27 p.
6. PEMEX. *Efecto de los componentes del GLP en la acumulación de ozono en la atmósfera de la zona metropolitana de la Ciudad de México*. Memoria técnica de estudio. México, PEMEX. 1997. 112 p.
7. Margulis, Sergio. *Back of the envelope estimates of environmental damage costs in México*. The World Bank, 1994, 27 p.
8. Asociación Mexicana de Gas Natural. www.amgn.org.mx
9. Gaceta UNAM *Cuenta anual 2000, patronato universitario*. 26 de marzo de 2001, 15 p.
10. http://omega.ilce.edu.mx/3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/159/htm/sec_7.htm
11. SAE, Technical Paper Series. *Fuel quality recommendations for natural gas vehicular fuel*. EUA, SAE, 1994.
12. Liquid Carbonic de Mexico. *Curso de entrenamiento en el manejo de GNL*. México, Liquid Carbonic de México, 59 p.
13. www.altingusa.com
14. Cryogas Engineering Ltd. *Liquid Methane, the new super fuel*. Canadá.1993.
15. www.naturalgas.com

- 
- 
-
16. Brian Cook. *Gas. Mexico*, Continental, 1985, 40 p.
 17. www.meltingpot.fortunecity.com/lightsey/740/page2.html
 18. www.alagasco.com/about/environment.asp
 19. www.naturalgas.org/ENVIRON2.HTM
 20. Comisión de Derechos Humanos. *La contaminación atmosférica en México*. México, CDH, 1992, 288 p.
 21. www.naturalfuels.com/quick_ref_fuel_guide.htm
 22. Liquid Carbonic de México. *Diferencias técnicas y económicas en el uso del Gas Natural Licuado y Gas Natural Comprimido en la Ciudad de México*. México, Liquid Carbonic de México, Boletín técnico, 1995, 6 p.
 23. www.geocities.com/medspain/sep00/contamina.html
 24. Taylor, Alicia. *Tesis Aditivo para gasolina*, Facultad de Química, UNAM. México, 2001
 25. Instituto Nacional de Ecología. www.ine.gob.mx, *NOM-092-ECOL-1999, NOM-094-ECOL-1993*.
 26. Asociación Internacional de Vehículos a Gas Natural. www.iangv.org
 27. Coalición de Vehículos a Gas Natural. www.ngvc.org
 28. www.ngvc.org/safetybulletin.html
 29. PEMEX. *Substitución de gasolinas en vehículos automotores por gas licuado y gas natural en el valle de México*. México, PEMEX, 1992, 43 p.
 30. Secretaría del Medio Ambiente. www.sma.df.gob.mx



BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA

- Assimov Isaac. *Introducción a la ciencia*. Barcelona, España; Ediciones Orbis, Muy Interesante, 1985, 836 p.
- Autotransportes Urbanos de Pasajeros, *Seguimiento del proyecto Combustibles Alternos*, México
- Autotransportes Urbanos de Pasajeros. *Análisis breve del uso de gas como combustible alternativo*. México, 1992.
- Centro Panamericano de Ecología Humana y salud, OPS & OMS. *Evaluación epidemiológica de riesgos causados por agentes químicos ambientales*. México, Limusa, 1988, 726 p.
- Liquid Carbonic de Mexico. *Alta Tecnología ambiental GNL*. México, Liquid Carbonic de México.
- Liquid Carbonic de México. *Análisis de riesgo para la planta piloto de licuefacción de Gas Natural*. México, Liquid Carbonic de México, 82 p.
- Liquid Carbonic de México. *Plan piloto para el uso y abasto de Gas Natural Licuado en México*. México, Liquid Carbonic de México, 1994.
- NOM-001-SECRE-1997 Calidad del gas natural, México, Diario Oficial
- NOM-002-SECRE-1997 Instalaciones para el aprovechamiento del gas natural, México, Diario Oficial
- NOM-003-SECRE-1997 Distribución del gas natural, México, Diario Oficial
- NOM-004-SECRE-1997 Gas natural licuado. Instalaciones vehiculares, México, Diario Oficial
- NOM-005-SECRE-1997 Gas natural licuado. Estaciones de servicio, México, Diario Oficial
- NOM-006-SECRE-1998 Odorización del gas natural, México, Diario Oficial
- NOM-007-SECRE-1998 Transporte de gas natural, México, Diario Oficial



- NOM-008-SECRE-1998 Protección catódica de tuberías de acero para GN y GLP, México, Diario Oficial
- NOM-042-ECOL-1999 Niveles máximos permisibles de emisión de HC no quemados, CO, NOx y PM del escape y HC del sistema de combustible en vehículos a gasolina, GLP, GN y diesel de uso ligero. (<3,857 kg), México, Diario Oficial
- NOM-076-ECOL-1995 Niveles máximos permisibles de emisión de HC no quemados, CO, NOx del escape y HC del sistema de combustible en vehículos a gasolina, GLP, GN u otros de uso pesado. (>3,857 kg), México, Diario Oficial
- NOM-094-SCFI-1994 Uso del GNL como combustible vehicular. Requisitos de seguridad para instalaciones vehiculares, México, Diario Oficial
- NOM-CCAT-014-ECOL1993 Niveles máximos permisibles de emisión de gases contaminantes del escape de vehículos con GLP, GN u otros alternos, México, Diario Oficial
- Recsa/ CNG Company. *GNC Gas Natural Comprimido*. México, 14 p.
- Reglamento del gas natural Ley reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el ramo del petróleo.
- Ruta 100. *Anexos al convenio de colaboración, aspectos ecológicos*. México.
- SAE de México. *Combustibles alternos*. México, SAE, 1992.
- SEDESOL. *Programa de administración de calidad del aire*. México, SEDESOL.
- Vachet, Pierre. *Las enfermedades de la vida moderna*. Barcelona, España, Nueva colección labor, 1973, 166 p.
- www.iangv.org
- www.ine.gob.mx
- www.naturalfuels.com
- www.ngvc.org
- www.sma.df.gob.mx