

01178



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## Programa de Posgrado en Ingeniería

**Impacto ambiental en la generación de energía secundaria:  
Costos, desarrollo sustentable y calentamiento global.**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
P R E S E N T A:  
VICTOR SHAMANN BAZÁN PERKINS

**DIRECTOR: Ing. Augusto Sánchez Cifuentes**

**JURADO:**

**Presidente: Dr. Víctor Rodríguez Padilla**  
**Vocal: Dr. Arturo Reinking Cejudo**  
**Secretario: Ing. Augusto Sánchez Cifuentes**  
**Suplente: Dr. Juan Mata Sandoval**  
**Suplente: Dra. Cecilia Martín del Campo M.**

México DF, Febrero de 2005

M342002



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

---

**Impacto ambiental en la generación de energía secundaria:  
Costos, desarrollo sustentable y calentamiento global.**

por Víctor Bazán

UNAM  
México, DF

---

## Resumen

El presente trabajo brinda una metodología para evaluar el uso eficiente de recursos energéticos dentro del marco conceptual de desarrollo sustentable e impacto ambiental en el aire por el uso y producción de energía secundaria.

El alcance de la tesis abarca la presentación y selección de distintos indicadores energético-ambientales de amplia aplicación, aportando su introducción a procesos específicos de generación de energía eléctrica y combustibles, así como su extrapolación a valoraciones económicas, todo esto, orientado a la planeación del Sector Energético Mexicano en una dimensión ecológica.

En el desarrollo del tema se estudian dos propuestas de generación de energía eléctrica en México: la primera, con la producción de *combustóleo ecológico* a partir de *crudo Maya* y la segunda, mediante la producción de *hidrógeno* a partir de *energía solar*, y por el *reformado catalítico* de combustibles fósiles; cuantificando según el caso su posición energético-ambiental con respecto a otros combustibles y tecnologías. Por último, se extiende el uso de algunos indicadores selectos para la evaluación económica del daño ambiental causado por la emisión de gases contaminantes generados en la producción de energía eléctrica en México con combustibles fósiles, presentando una nueva herramienta para la evaluación del costo económico asociado al impacto ambiental al aire por gases contaminantes.

---

Palabras clave: sustentable, gases, indicadores, energía, costo.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.  
NOMBRE: Victors Bazán Perkins  
FECHA: 09/03/2005  
FIRMA: 

---

## Abstract

The present work offers a procedure to evaluate the efficient use of power sources, employing sustainable development and environmental air impact as a conceptual models in the use and production of secondary energy.

The scope of this work includes the conceptual location and selection of different environmental and energy indicators with wide application, and the mathematical models which control these indicators; providing their introduction to specific processes of electrical energy and fuel production, as well as, their use in economic evaluations and the analysis of results with the aim to develop strategic planning of the Mexican Power Sector in its ecological dimension.

This work also presents two proposals for electrical energy generation in Mexico: first, the production of *ecological fuel oil* from *Maya crude oil*, and second, hydrogen production using renewable or non-renewable power sources, quantifying in each case, the energy-ecological position of the fuel or technology with respect to each other. Finally, the work presents the use of some selected indicators and their application to the economic evaluation of the environmental damage caused by polluting gases with repercussions at local, regional or global levels, introducing a new economic tool, in order to assess the *environmental impact cost* of polluting gases.

---

Keywords: sustainable, gases, indicators, energy, cost.

Lento pero viene, el futuro real  
El mismo que inventamos nosotros y el azar  
Cada vez más nosotros y menos el azar  
Espacio pero viene, lento, pero viene.

---

**M. Benedetti**

## Índice

Lista de Tablas	9
Lista de Figuras	10
Lista de Gráficas	10
Acrónimos y Abreviaturas	11
Presentación	13
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>14</b>
<b>Capítulo 2. Elementos de Uso Eficiente de Energía y Medio Ambiente</b>	<b>16</b>
2.1 Introducción	16
2.2 El Desarrollo Sustentable	19
2.3 Indicadores de Desarrollo Sustentable	20
2.4 Renovabilidad de un Recurso	23
2.5 Eficiencia Exergética Sustentable	24
2.6 Efecto Invernadero y Calentamiento Global del Planeta	27
2.7 Potenciales de Calentamiento Global (GWP)	28
2.8 La Generación Antropogénica de Gases de Efecto Invernadero	29
2.9 Características de Algunos Contaminantes Gaseosos del Aire	29
2.9.1 Monóxido de Carbono (CO)	29
2.9.2 Bióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	30
2.9.3 Bióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	32
2.9.4 Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> : NO, NO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O)	33
2.9.5 Smog Fotoquímico	34
2.9.6 Impacto de Refrigerantes	34
2.9.7 Metano (CH <sub>4</sub> )	35
2.10 Factores de Emisión	35
2.11 Concepto de Equivalente de Bióxido de Carbono	36
2.12 Eficiencia Ecológica de Emisiones Gaseosas	37
2.13 Marco Regulatorio Ambiental Nacional	41
2.14 Bibliografía	44
<b>Capítulo 3. Tecnologías y Combustibles para la Generación de Energía Eléctrica</b>	<b>45</b>
3.1 Introducción	45
3.2 Los Combustibles Fósiles	45
3.2.1 Carbón	46
3.2.2 Diesel	47
3.2.3 Combustóleo	48
3.2.4 Gas Natural	49
3.3 Limpieza de Elementos Contaminantes en Combustibles Fósiles	50
3.4 Generalidades sobre la Combustión de Fuentes Fósiles	53
3.5 Combustión y Calidad del Aire	54
3.6 Hidrógeno	56
3.7 Utilización de Hidrógeno en la Industria	58
3.8 Producción de Hidrógeno por el Proceso de Reformado de Vapor	58
3.9 Biocombustibles	60
3.9.1 Bioetanol	60
3.9.2 Biodiésel	60
3.9.3 Biogas	61
3.10 Resumen	62
3.11 Bibliografía	63

<b>Capítulo 4. Eficiencia Ecológica de Combustibles Fósiles Mexicanos</b>	<b>64</b>
4.1 Introducción	64
4.2 Análisis de Eficiencia Ecológica de los Combustibles Fósiles en México	
4.3 Evaluación de la Diversificación de la Canasta de Combustibles Fósiles Mediante la Eficiencia Ecológica de Emisiones Gaseosas	69
4.4 Conclusiones	71
4.5 Bibliografía	72
<b>Capítulo 5. Costos Económicos de Emisiones Gaseosas Contaminantes</b>	<b>73</b>
5.1 Introducción	73
5.2 Impacto Local y Global a la Contaminación del Aire por Emisiones Gaseosas	73
5.3 Determinación del Contaminante Integral	74
5.4 Costo Económico Asociado a Emisiones de Gases Contaminantes	76
5.5 Conclusiones	78
5.5 Bibliografía	79
<b>Capítulo 6. Sustentabilidad de Procesos de Generación de Energía con Hidrógeno</b>	<b>80</b>
6.1 Introducción	80
6.2 <i>¿De dónde se obtendrá el hidrógeno?</i>	80
6.3 Producción de Hidrógeno Mediante el Proceso de Reformado Catalítico	81
6.4 Evaluación de Eficiencia Exergética Sustentable por Vía Fuentes Fósiles	82
6.5 Producción de Hidrógeno con Energía Solar	83
6.6 Evaluación de la Eficiencia Exergética Sustentable Mediante Fuente Solar	84
6.7 Conclusiones	85
6.8 Bibliografía	86
<b>Capítulo 7. Conclusiones Finales</b>	<b>88</b>
<b>Anexos</b>	<b>89</b>
Artículo sobre la Introducción de Combustóleo Ecológico al Sector Eléctrico Mexicano	89
A1 Prefijos de Múltiplos de Unidades	97
A2 Poder Calorífico Inferior (PCI) para Distintos Gases y Combustibles	97
A3 Consumo de Combustibles Fósiles para la Generación de Electricidad	98
A4 Factores de Planta y Eficiencia Térmica de Tecnologías de Generación	99
A5 Propiedad de Algunos Combustibles Fósiles	99
A6 Comparación de Propiedades entre Biodieseles y el Diesel Convencional	99
A7 Propiedades del Combustóleo	100
A8 Propiedades del Hidrógeno	100
A9 Formulas Químicas	100
A10 Composición del Gas Natural	100
A11 Potenciales de Calentamiento Global	101
A12 Emisiones de CO <sub>2</sub> para distintos Combustibles	102
A13 Propiedades de Hidrógeno, Metano y Propano	102
A14 Factores de Emisión de Acuerdo con IPCC (Kg/TJ)	103
A15 Factores de Emisión de Acuerdo con EPA (AP-42) (Kg/TJ)	100
A16 Factores de Emisión NOM-ECOL-085-1994	101
A17 Propiedades del Aire	103
A18 Correlaciones de Szargut y Styrylska para Cálculo de $\varphi$	103
A19 Memorias de Cálculo	104



## Lista de Tablas

### Capítulo 2

Tabla 2.1: Prospectiva de Generación de Electricidad en México (TWh)	16
Tabla 2.2: Indicadores de Sustentabilidad del WEC	20
Tabla 2.3: Indicadores de Sustentabilidad de la ONU	21
Tabla 2.4: Valores de Renovabilidad para Diferentes Recursos Energéticos	24
Tabla 2.5: Potenciales de Calentamiento Global	28
Tabla 2.6: Índices de Concentración de GEI en la Atmósfera	29
Tabla 2.7: Promedio Anual de Carbono Removido por la Actividad Humana (1980-89)	30
Tabla 2.8: Estándares de Calidad Ambiental en Distintos Países [mg/m <sup>3</sup> ]	36
Tabla 2.9: Nomenclatura para el Control de Emisiones en Procesos Industriales	37
Tabla 2.10: Características de Algunos Combustibles	39
Tabla 2.11: Normas Mexicanas Vigentes para la Contaminación de la Atmósfera	41
Tabla 2.12: NOM de Medición de Concentraciones (ECOL)	42
Tabla 2.13: NOM Vigentes para la Contaminación Atmosférica (Industria)	42
Tabla 2.14: NOM para la Contaminación Atmosférica (Calidad de Combustibles)	43
Tabla 2.15: Normas Oficiales de la Secretaria de Salud (SSA) para Calidad del Aire	43

### Capítulo 3

Tabla 3.1: Reservas Probadas de Gas Natural y Petróleo en México 1998-2003	45
Tabla 3.2: Reservas Probadas de Carbón Térmico en México (1995).	46
Tabla 3.3: Clasificación de Carbones por Rango	46
Tabla 3.4: Características del Proceso por cada MMpcd de H <sub>2</sub> Producido	60

### Capítulo 4

Tabla 4.1: Emisiones de Gases Contaminantes Provenientes de Gas Natural	66
Tabla 4.2: Emisiones de Gases Contaminantes Provenientes de Carbón	66
Tabla 4.3: Emisiones de Gases Contaminantes Provenientes de Combustóleo	66
Tabla 4.4: Emisiones de Gases Contaminantes Provenientes del Diesel	67
Tabla 4.5: Eficiencia Ecológica de los Combustibles Fósiles en México	68
Tabla 4.6: Características de Productos del Proceso H-Oil	70
Tabla 4.7: Eficiencia Ecológica Promedio de Combustibles Fósiles Mexicanos	71

### Capítulo 5

Tabla 5.1: Estándares de Calidad Ambiental en México [mg/m <sup>3</sup> ]	75
Tabla 5.2: Potenciales de Calentamiento Global del Planeta	75
Tabla 5.3: Emisiones de Gases Contaminantes Totales en México 2001 [Ton/año]	77
Tabla 5.4: Costo de Emisiones Gaseosas Contaminantes en la Producción de Electricidad	77

## Capítulo 6

Tabla 6.1: Consumos del Proceso de Reformado (por MMpcd de H <sub>2</sub> Producido)	82
Tabla 6.2: Balance de Exergía del Proceso de Reformado	82
Tabla 6.3: Evaluación de la Ruta de Combustibles Fósiles para Producir H <sub>2</sub>	82
Tabla 6.4: Análisis del Sistema de Generación con Energía Solar	84
Tabla 6.5: Alimentaciones para la Producción de H <sub>2</sub> por Ruta Solar	84
Tabla 6.6: Productos de la Generación de H <sub>2</sub> por Ruta Solar	84
Tabla 6.7: Comparación de Eficiencias para la Obtención de Hidrógeno	85

## Capítulo 7

Tabla 7.1: Evaluación de Eficiencias Ecológicas de Combustibles Mexicanos	87
---	----

### Lista de Figuras

Figura 3.1: Planta de Potencia de Gas con Turbinas en Ciclo Combinado	50
Figura 3.2: Proceso H-Oil de Hidrodesintegración de Aceites Residuales	51
Figura 3.3: Eliminación de SO <sub>2</sub> en el Uso de Combustibles Fósiles	52
Figura 3.4: Proceso de Reformado de Vapor-Metano	59
Figura 3.5: Sistema Típico de Biogas	62
Figura 6.1: Proceso de Reformado Catalítico	81
Figura 6.2: Esquema de Producción de H <sub>2</sub> por Ruta Solar	83

### Lista de Gráficas

Gráfica 2.1: Proyección al 2020 de Generación de Energía Eléctrica en México	17
Gráfica 2.2: Variaciones de la Temperatura en la Superficie de la Tierra (140 años)	18
Gráfica 2.3: Evolución de la Concentración Atmosférica de CO <sub>2</sub>	31
Gráfica 3.1: Generación de Energía Eléctrica por Plantas Carboeléctricas	47
Gráfica 3.2: Combustóleo y Gas en la Generación de Electricidad en México	48
Gráfica 4.1: Eficiencia Eco-gas para una Canasta de Combustibles Nacionales	67
Gráfica 4.2: Posición del Combustóleo Ecológico Respecto a Otros Combustibles	71

## Acrónimos y Abreviaturas

<b>A,</b>	Área [m <sup>2</sup> ]
<b>AQR:</b>	Air Quality Standard, Patrón de calidad del aire [mg/m <sup>3</sup> ]
<b>BPD</b>	Barriles de petróleo por día (Barriles/día)
<b>C,</b>	Capacidad calorífica específica [J/kg K] o capacidad calorífica [J/K]
<b>CEPAL:</b>	Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
<b>CC,</b>	Central Termoeléctrica con Turbinas de Gas en Ciclo Combinado
<b>CCR:</b>	Carbón Conradson Residual
<b>(CO<sub>2</sub>)<sub>T</sub></b>	Contaminante integral
<b>CFE</b>	Comisión Federal de Energía.
<b><math>\varepsilon_{\text{eco gas}}</math></b>	Eficiencia ecológica de emisiones gaseosas [%]
<b><math>\varepsilon^{\circ}</math></b>	Exergía química de un compuesto
<b>e, E</b>	Exergía específica [J/kg, Wh/kg] o exergía, [J, Wh]
<b>EPA:</b>	Environmental Protection Agency
<b>F:</b>	Fuel, Combustible
<b>G:</b>	Tasa de regeneración (o generación natural) de un recurso
<b>GN:</b>	Gas Natural
<b>GHG's:</b>	Green House Gases, Gases de efecto invernadero (GEI)
<b>GLP:</b>	Gas Licuado de Petróleo
<b>GWP:</b>	Global Warming Potential
<b><math>\eta</math>,</b>	Eficiencia térmica = $Q_{out}/Q_{in}$ donde $Q$ es energía [%]
<b><math>\eta_{\text{ex}}</math></b>	Eficiencia exergética = $E_{out}/E_{in}$ [%]
<b><math>\eta_{\text{eco sus}}</math></b>	Eficiencia exergética sustentable [%]
<b><math>h</math>,</b>	Entalpía específica [J/kg, Wh/kg] o entalpía $H = U + pV$ [J, Wh].
<b><math>H_0</math></b>	Entalpía para sistemas en equilibrio con el ambiente de referencia.
<b>HDA:</b>	Hidesintegración de Compuestos Aromáticos
<b>HDM:</b>	Hidrodemetalización
<b>HDT:</b>	Hidrodesintegración Catalítica o Hidrotratamiento Catalítico
<b>HDR:</b>	Hidrodesintegración de Residuales
<b>HDCCR:</b>	Hidrodesintegración de Carbón Conradson Residual
<b>IPCC:</b>	Intergovernmental Panel of Climate Change,
<b><math>I_{\text{EA}}</math>:</b>	Indicador energético ambiental
<b><math>I_{\text{no-renov}}</math>:</b>	Irreversibilidad o pérdida de exergía de un recurso no renovable.
<b><math>\varphi</math>,</b>	Cociente $\varepsilon^{\circ} / \text{PCI}$ .
<b>k:</b>	Factor de costo exergético, $k = 1/\eta_{\text{ex}}$
<b><math>\kappa</math>:</b>	Constantes
<b><math>\mu_i</math></b>	Potencial químico de una sustancia $i$ [J/mol], (function de Gibbs molar).
<b><math>\mu_{i0}</math></b>	Potencial químico de una sustancia $i$ en estado ambiente de referencia [J/mol]
<b>MMb</b>	Millones de barriles
<b>MMpcd:</b>	Millones de pies cúbicos por día [MMft <sup>3</sup> /d]
<b>MMMpc:</b>	Miles de Millones de pies cúbicos [MMMft <sup>3</sup> ]

<b>m</b>	Masa [kg]
<b>m<sub>f</sub></b>	Flujo de combustible [Ton/año]
<b>n<sub>i</sub></b>	Número de moles de la sustancia <i>i</i> [mol]
<b>NOM:</b>	Norma Oficial Mexicana
<b>NMX:</b>	Norma Mexicana
<b>NMVOC</b>	Non-Metane Volatile Organic Compounds.
<b>OLADE:</b>	Organización Latinoamericana de Energía
<b>P</b>	Presión [Pa], Po Presión ambiental [Pa, bar] donde 101.3 kPa = 1.013 bar
<b>PCI,</b>	Poder Calorífico Inferior [MJ/Kg]
<b>PCS,</b>	Poder Calorífico Superior [MJ/Kg]
<b>PIB:</b>	Producto Interno Bruto
<b>ppm<sub>v</sub></b>	Partes por millón (10 <sup>6</sup> en volumen)
<b>ppb<sub>v</sub></b>	Partes por mil millones (10 <sup>9</sup> en volumen)
<b>ppt<sub>v</sub></b>	Partes por billón (10 <sup>12</sup> en volumen)
<b>PST</b>	Partículas Suspendidas Totales [Ton/año]
<b>q, Q</b>	Calor específico [J/kg, Wh/kg] o calor [J, Wh]
<b>ρ<sub>a</sub>,</b>	Densidad del aire [1.225 Kg/m <sup>3</sup> ]
<b>ρ<sub>r</sub>,</b>	Densidad relativa al agua
<b>R</b>	Constante molar de gas ≈ 8.314 [J/mol K], Gas ideal: $PV = nRT$
<b>R<sub>s</sub></b>	Radiación solar total anual [MJ/m <sup>2</sup> día]
<b>R<sub>c</sub></b>	Renovabilidad de un recurso energético
<b>σ<sub>x</sub>,</b>	Porcentaje en peso de reducción en la concentración del contaminante x
<b>S</b>	Reservas probadas de un recurso
<b>S</b>	Entropía, propiedad termodinámica (2nd Ley): $dS \geq \delta Q/T$ [J/K]
<b>S<sub>0</sub></b>	Entropía ambiental de un sistema a condiciones ambientales de referencia [J/K]
<b>s,</b>	Entropía específica (por unidad de masa, o sustancia) <i>i</i> , [J/kg K]
<b>SNR:</b>	Sistema Nacional de Refinerías
<b>t</b>	Tiempo [s, h], 1 año = 8760 h = 31,536,000 s
<b>T</b>	Temperatura [K] (0 K = -273.15°C)
<b>T<sub>0</sub></b>	Temperatura ambiente [K] usualmente 20°C = 293.15 K
<b>T<sub>x</sub></b>	Costo anual total de emisiones por combustible (\$/s)
<b>U,</b>	Velocidad de explotación (o consumo) de un recurso energético.
<b>USD</b>	Dólares de Estados Unidos.
<b>v, V</b>	Volumen específico [m <sup>3</sup> /kg] y volumen [m <sup>3</sup> ]
<b>W</b>	Work, Trabajo [J, Wh]
<b>WEC:</b>	World Energy Council
<b>x<sub>i</sub>,</b>	Fracción molar del componente <i>i</i> [%]

**Sub indices:**

<b>i</b>	Indica una sustancia o elemento	<b>Out</b>	Output, Salida
<b>0</b>	Estado ambiental de referencia	<b>In</b>	Inlet, Entrada o alimentación
<b>pc</b>	Per cápita (por habitante)	<b>ex</b>	Exergético

---

## Presentación

El presente tema de tesis surge ante la pertinencia de realizar un estudio del impacto ambiental que tendría la puesta en marcha de una propuesta técnica enfocada a la generación de energía eléctrica en base a *combustóleo ecológico* generado a partir de *crudo Maya* y quemado en centrales termoeléctricas convencionales, como nueva alternativa de generación de energía eléctrica, dicha propuesta ha sido anexada, y surge como consecuencia de la reducción en la construcción de *centrales termoeléctricas convencionales* alimentadas principalmente por combustóleo, las cuales han sido desplazadas por la construcción de centrales termoeléctricas de *ciclo combinado* alimentadas con gas natural. La propuesta mencionada busca generar alternativas de inversión en infraestructura tecnológica que den pie a un desarrollo racional del Sector Energético Mexicano, congruente con su realidad económica, política y acorde a la disponibilidad de recursos con que el país cuenta, a fin de conservar su autonomía en este rubro y cumplir con sus necesidades energéticas sin hacer reformas constitucionales para cumplirlas.

El trabajo aborda también el estudio de la producción de hidrógeno por su potencial importancia como energético, pues se augura un futuro donde este combustible tendrá un papel protagónico en materia de producción de energía y la protección al ambiente.

Agradezco al Ing. Augusto Sánchez por su apoyo y orientación para dar forma y dirección al desarrollo del tema. Así mismo, agradezco al Dr. Juan Mata por sus valiosas aportaciones y elementos para el análisis de datos y observaciones. Al Dr. Víctor Rodríguez por su orientación, sus valiosos consejos y por facilitarme sus materiales de apoyo para revisión de tesis. A la Dra. Cecilia Martín del Campo a quien agradezco profundamente sus correcciones y sugerencias para mejorar la calidad del trabajo y al Dr. Arturo Reinking por el apoyo y orientación para la estructuración y mejoramiento del trabajo; y en general, agradezco a todos por su tiempo invertido en mi asesoramiento y formación.

Agradezco particularmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por apoyarme como becario para realización de mis Estudios de Posgrado.

Ofrezco un agradecimiento enorme a mi familia, en particular a mi fascinante esposa Yanella por su apoyo diario y su ayuda en la revisión del texto. A mis queridos padres por haberme apoyado en todo momento para mi desarrollo profesional, que considero el mejor regalo que puede otorgársele a un hijo.

Agradezco infinitamente a los hombres y mujeres de hoy, y a nuestros aguerridos abuelos revolucionarios de ayer, quienes han luchado por el derecho de todos los mexicanos a la energía, la salud, el trabajo, el agua y la educación pública y gratuita; lucha con la cual estoy comprometido y con la que fue posible mi acceso y el de muchos otros a la educación en todos sus niveles.

---

## Capítulo I. Introducción

El hombre moderno busca satisfacer sus necesidades cotidianas, las cuales con el paso de los siglos se han vuelto más específicas y sofisticadas, ante ello, se ve en la diaria tarea de producir bienes y transformar recursos para cubrirlas, exigiéndose diariamente una mejor calidad de productos y con el menor costo, buscando así incidir en la mejora constante de su calidad de vida.

Este proceso continuo, requiere también de cantidades cada vez mayores de energía trayendo como resultado enfrentar problemas ambientales (locales, regionales y globales) por la generación de contaminación debida a la transformación y aprovechamiento de la energía disponible en los recursos naturales. Sabemos entonces como aprovechar los recursos disponibles e incluso como canalizarlos para cubrir nuestras necesidades, pero: ¿sabemos medir el impacto ambiental asociado?, y en tal caso ¿es posible evaluar simultáneamente todos los parámetros implicados: químicos, ambientales, técnicos e incluso económicos?

Existen diversos indicadores ambientales y energéticos que pueden proporcionar una serie amplia de parámetros sobre un proceso, el aprovechamiento de un recurso o el grado de incidencia de un contaminante en la salud y el ambiente.

La hipótesis es determinar si es posible *conocer la jerarquía energético-ambiental de la canasta de combustibles y tecnologías utilizadas para la generación de energía secundaria<sup>1</sup> en México*, obteniendo la posición de cada energético y fuente en una escala de eficiencia energética-ambiental.<sup>2</sup> Con esto se tendrá una *metodología accesible para la evaluación de nuevos procesos para la producción de energía eléctrica y combustibles*, que representen opciones alternativas de desarrollo para el sector energético, teniendo la posibilidad de hacer una evaluación ambiental de su factibilidad, o bien, haciendo un estudio periódico de las opciones existentes.

En los diversos capítulos que componen esta tesis se presentan elementos para la evaluación de la producción de energía secundaria en una dimensión ecológica, mediante la evaluación de distintos conceptos e indicadores energético-ambientales, los cuales en su conjunto sirven para comparar el impacto ambiental y la sustentabilidad de distintos combustibles y procesos industriales para la producción de energía, así mismo, estos indicadores permiten la valoración de nuevas rutas para la producción de energía eléctrica o combustibles útiles en la planeación y administración de los recursos energéticos desde un punto de vista ecológico, energético e inclusive económico.

---

<sup>1</sup> Las fuentes *primarias de energía* corresponden a la energía tal y como se obtiene de la naturaleza, pueden ser el carbón, el petróleo crudo, el gas natural, la hidroenergía, la geoenergía, la nucleenergía, geoenergía, la energía solar y eólica. Las fuentes de *energía secundaria* son energéticos derivados de las fuentes primarias y se obtienen en los centros de transformación, con características específicas para su consumo final, tales como el coque, GLP, gasolinas, naftas, querosenos, diesel, combustóleo, productos no energéticos y electricidad.

<sup>2</sup> De las fuentes renovables de energía solo se estudio la energía solar.

En el *capítulo 2* se abordan los elementos conceptuales necesarios para evaluar el aprovechamiento de los recursos energéticos, poniendo énfasis en la presentación de distintos indicadores útiles en la valoración del aprovechamiento y uso eficiente de energía dentro de un marco de impacto ambiental. Algunos de estos indicadores se sostienen bajo un modelo que permite hacer una evaluación conjunta del aprovechamiento energético del recurso y las implicaciones ecológicas por su uso. Por ello, estos indicadores son seleccionados para aplicarlos en los capítulos 4 y 5.

En el *capítulo 3* se estudian generalidades sobre los combustibles fósiles utilizados para la producción de energía eléctrica en México, abarcando la disponibilidad de los recursos y sus aplicaciones, se revisan algunas tecnologías para su procesamiento, y algunos elementos de las reacciones de combustión y sus implicaciones ambientales. Así mismo, se presenta la posición, características, tecnologías y perspectivas del hidrógeno como vector de desarrollo energético y por último se examinan generalidades sobre los biocombustibles, su variedad, origen y aplicación. Teniendo al final del capítulo un panorama completo de la canasta de opciones para la generación de energía y recursos útiles para el sector energético.

En el *capítulo 4* se aplica el concepto de *eficiencia ecológica de emisiones gaseosas* ( $\epsilon_{\text{eco gas}}$ ), para evaluar la generación de gases contaminantes con impacto regional y local emitidas por la combustión de los principales combustibles fósiles utilizados en la generación de energía eléctrica en México en un periodo de 5 años, también se analizan variaciones en la calidad de un combustóleo a fin de determinar sus implicaciones ambientales hacia el aire con respecto a otros combustibles, utilizando el indicador como herramienta de estudio para conocer impacto ambiental por el mejoramiento de sus propiedades y composición.

En el *capítulo 5* se desarrolla una metodología para la evaluación del costo económico hipotético que puede tener la emisión de una mezcla de gases contaminantes con impactos ambientales a nivel local, regional y adicionalmente a nivel global; el estudio se realiza para el caso de México y se determinan los costos económicos asociados a la contaminación ambiental del aire por la emisión de gases contaminantes en la producción de energía eléctrica en el año 2001 con combustibles fósiles.

En el *capítulo 6* se aplica el concepto de *eficiencia exergética sustentable* ( $\eta_{\text{eco sus}}$ ) a la producción de hidrógeno, tomando en cuenta su importancia como eventual sustituto del petróleo en la producción de energía. El indicador se evalúa para la producción de hidrógeno con dos distintas rutas tecnológicas: 1) vía combustibles fósiles y 2) vía energía solar; evidenciando las bondades y deficiencias energético-ambientales de cada tecnología mediante un análisis comparativo de resultados.

Finalmente en el capítulo 7 se elabora un resumen de los indicadores evaluados y se presentan las posibles rutas de cálculo para la determinación de estos indicadores, resaltando la utilidad de las herramientas para justificar la introducción de los recursos energéticos estudiados (hidrógeno y combustóleo ecológico) a la canasta de combustibles para la generación de energía eléctrica en México.

## Capítulo 2. Elementos de Uso Eficiente de Energía y Medio Ambiente.

### 2.1 Introducción

La mera existencia de nuestra sociedad tecnológica depende de un abundante suministro de energía y es vital para toda economía contar con los recursos necesarios para sostener un desarrollo energético de acuerdo con sus necesidades. México es rico en recursos energéticos al contar con varios campos geotérmicos, grandes ríos, regiones de intensos vientos, prolongados periodos de luz solar y yacimientos de carbón, petróleo y gas, que dan al país un amplio abanico de alternativas de suministro energético.

En la Tabla 2.1 se muestra el panorama para las siguientes tres décadas en materia de generación e energía eléctrica en cuanto a consumo de combustibles, en ella destacan los volúmenes de recursos fósiles sobre el resto de las fuentes de energía.

Tabla 2.1: **Prospectiva de Generación de Electricidad en México (TWh)**

Fuente	1990	2000	2010	2030	Crecimiento promedio anual 2000-2030
Carbón	8	19	22	32	1.7
Petróleo	70	97	109	141	1.2
Gas	13	40	97	296	6.9
Nuclear	3	8	10	10	0.8
Hidráulica	23	33	43	58	1.9
Otros Renovables	6	6	13	41	6.7
Total	123	204	294	578	3.5

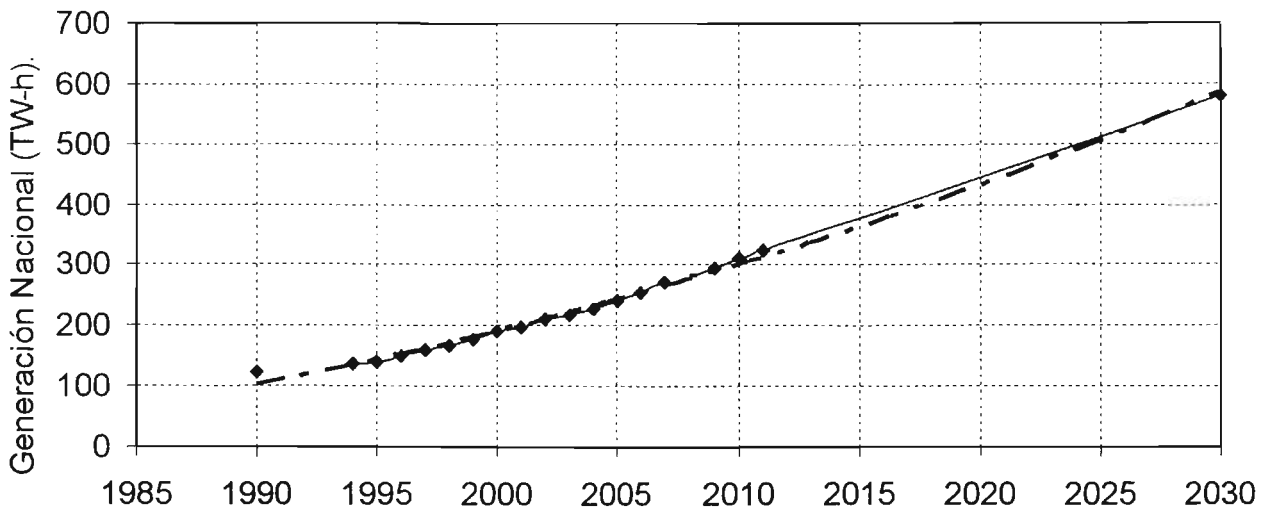
Fuente: Internacional Energy Agency, Mexico Energy Outlook, OCDE/AIE. 2002. p 30

La Industria Eléctrica a nivel mundial tiene como común denominador la predominante generación de energía por la combustión de los derivados del petróleo, el gas natural y el carbón, que constituyen un vector importante en la contaminación del aire al generar emisiones contaminantes gaseosas de bióxido de carbono (efecto invernadero), bióxido de azufre (lluvia ácida) y varios óxidos de nitrógeno e hidrocarburos de combustión incompleta (en la formación del smog fotoquímico), todos ellos con repercusiones directas a la salud de las personas o al deterioro del medio ambiente en sus dimensiones local y global.

Las proyecciones a futuro en materia de consumo de energía eléctrica (Gráfica 2.1) sugieren la revisión de las alternativas tecnologías disponibles para la construcción de la infraestructura apropiada para hacer frente a la demanda energética que se avecina en los próximos años, para que al mismo tiempo sea acompañada de innovaciones tecnológicas que sean amigables al mismo tiempo con el ambiente.



Gráfica 2.1: Proyección al 2020 de Generación de Energía Eléctrica en México



Fuente: Comisión Federal de Electricidad. [www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx)

En términos ambientales los escenarios a futuro también demandan atención. Se ha encontrado que existe una fuerte correlación entre el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero<sup>3</sup> con la temperatura global del planeta y que ha mostrado una tendencia al aumento a lo largo del último siglo, en concordancia al incremento de los volúmenes de gases contaminantes emitidos a la atmósfera por fuentes antropogénicas.

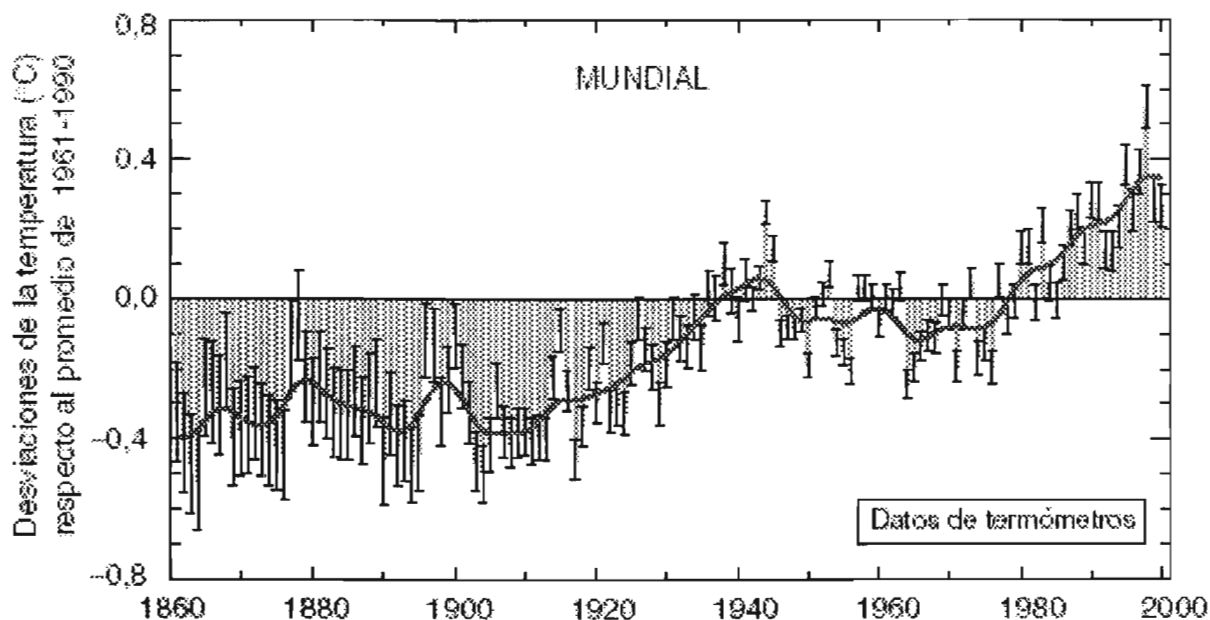
El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y la comunidad científica a nivel mundial han avanzado en la búsqueda de pruebas sólidas que indiquen en qué magnitud el factor antropogénico está alterando la variación del clima del planeta.

En términos concretos, se ha observado que la temperatura media mundial de la superficie (es decir, el promedio de la temperatura del aire cerca de la superficie de la tierra y de la temperatura de la superficie del mar) ha subido desde 1861. Durante el siglo XX, el aumento ha sido de  $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$  (Gráfica 2). El registro muestra una gran variabilidad. Por ejemplo, la mayor parte del calentamiento que se produjo en el siglo XX tuvo lugar en dos períodos: de 1910 a 1945 y de 1976 a 2000<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> Principales Gases de efecto invernadero: (H<sub>2</sub>O)<sub>g</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC, O<sub>3</sub> Troposférico y SF<sub>6</sub>.

<sup>4</sup> Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Tercer Informe de Evaluación, Cambio climático 2001, *La base científica*. 2001. p.3

Gráfica 2.2: Variaciones de Temperatura en la Superficie de la Tierra (140 años<sup>5</sup>)



Fuente: IPCC, La base científica. Tercer Informe de Cambio Climático. 2001

El balance de las pruebas que ha presentado el IPCC, en diversos informes indica una influencia humana apreciable en el clima mundial pues los factores antropogénicos han mostrado una fuerte correlación con la desviación de un clima natural. La mayoría de los estudios han llegado a la conclusión de que, en los últimos 50 años, la velocidad y la magnitud estimadas del calentamiento de la Tierra causado únicamente por el aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero son similares o superiores a la velocidad y la magnitud del calentamiento observado.

Es un hecho que el clima está cambiando, y es evidente que a medida que la humanidad requiera de cantidades cada vez mayores de energía para satisfacer sus necesidades, se verá en la necesidad de utilizar los recursos naturales disponibles. No es posible crear energía de la nada, y sólo se puede hacer uso de la energía que la naturaleza tiene almacenada en distintas formas para canalizarla a su favor. El mundo está lejos de una crisis energética, existen abundantes recursos para satisfacer las necesidades energéticas mundiales, sin embargo a medida que se consumen los recursos disponibles es necesario reducir los impactos ambientales que aparentan ser el factor principal en el incremento de costos de la energía en un futuro no muy lejano.

<sup>5</sup> La temperatura de la superficie de la Tierra se expone anualmente (barras grises) y aproximadamente por decenio (línea, curva anual filtrada que suprime las fluctuaciones por debajo de las escalas temporales próximas). Hay incertidumbres en los datos anuales (las barras negras muy finas representan el intervalo de confianza del 95 %) debido a las lagunas de datos, a las incertidumbres y errores instrumentales aleatorios. En los últimos 140 y 100 años, la mejor estimación indica que la temperatura promedio mundial de la superficie ha aumentado  $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ . (Fuente: IPCC., Op. Cit p.4)

## 2.2 El Desarrollo Sustentable

La circulación amplia del concepto *desarrollo sustentable*, en los últimos años tiene como principal difusor a los distintos programas y divisiones de Naciones Unidas, pues es resultado de la evolución de una serie de reuniones mundiales en las cuales el medio ambiente ha sido el tema central. Naciones Unidas ha emitido la convocatoria continuamente, por su amplio alcance y su supuesta neutralidad ideológica, de ahí que se hayan generado documentos y acuerdos que empezaron a sentar las bases para la búsqueda de conceptos y políticas comunes a nivel mundial.

El *desarrollo* por sí mismo, puede ser concebido como un proceso dinámico en permanente desequilibrio, que tiende al mejoramiento de las condiciones de vida de toda la población del mundo, en los términos que las personas deben definir disponiendo de la información necesaria para analizar las consecuencias de la resolución acordada. El desarrollo debe ser endógeno, autogestionado y sustentable, sin agredir a otros grupos humanos para lograr los objetivos propios.

El *desarrollo sustentable*, para serlo y diferenciarse del simple crecimiento, tecnificación, industrialización, urbanización, o aceleración de los ritmos, debe satisfacer ciertas condiciones, además de ser endógeno, es decir nacido y adecuado a la especificidad local, debe ser autogestionado, es decir, planificado ejecutado y administrado por los propios sujetos del desarrollo:

El Informe Bruntland "*Nuestro futuro común*"<sup>6</sup>. Define que el desarrollo sustentable (o sostenible) es cuando *se satisfacen las necesidades de la presente generación sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para que satisfagan sus propias necesidades*.

La sustentabilidad como concepto propone un cambio de paradigma en distintas áreas, pudiendo hablar de *sustentabilidad* ecológica, para proteger la base de recursos naturales en el futuro, sin dejar de utilizarlos, los recursos genéticos, (humanos, forestales, pesqueros, microbiológicos) agua y suelo; sustentabilidad energética, investigando, diseñando y utilizando tecnologías que consuman niveles racionales de energía, fundamentales en el caso del desarrollo rural y que, sin que agredan mediante su uso a los demás elementos del sistema; sustentabilidad social, para que los modelos de desarrollo y los recursos derivados del mismo beneficien por igual a toda la humanidad, estableciendo equidad; sustentabilidad cultural, favoreciendo la diversidad y especificidad de las manifestaciones locales, regionales, nacionales e internacionales, sin restringir la cultura a un nivel particular de actividades, sino incluyendo en ella la mayor variedad de actividades humanas; sustentabilidad científica, en el apoyo irrestricto a la investigación en ciencia pura, aplicada y tecnológica, sin permitir que la primera se vea orientada exclusivamente por criterios de rentabilidad inmediata y corto-placista<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup> World Commission on Environment and Development. 1987. *Our Common Future*. Oxford, New York: Oxford University Press. Primera parte.

<sup>7</sup> J.M. Calvelo Rios, Desarrollo: Comunicación, Información y Capacitación. 2001 (<http://www.iicd-run.org/paq6.html>)

## 2.3 Indicadores de Desarrollo Sustentable

El medio ambiente es a menudo víctima de las necesidades de industrialización de los países en desarrollo, ya que continuamente éstos carecen de los recursos requeridos para ejercer el control medioambiental. Muchas ciudades de países en desarrollo soportan actualmente inmensas zonas industriales donde los beneficios económicos de la concentración industrial son sobrepuestos a los riesgos ecológicos y sanitarios.

Los países desarrollados instalan algunas de sus industrias más nocivas en países en desarrollo, así como la disposición de sus residuos peligrosos. *Pero tanto los países en desarrollo como los desarrollados padecen las consecuencias de la contaminación atmosférica producida en su mayor parte los países desarrollados.*

En el desarrollo sustentable se reconocen como dimensiones relevantes la libertad política, el bienestar económico, la equidad social y un medio ambiente sano, además una cierta conservación de los recursos naturales. Esas dimensiones se extienden en el espacio (terrestre y aéreo) y en el tiempo (presente y futuro)<sup>8</sup>.

Asociados a las dimensiones del desarrollo sustentable se han definido distintos conjuntos de indicadores que buscan comparar y caracterizar situaciones entre países (transversal) y/o en la evolución temporal que tiene cada país (vertical).

El Consejo Mundial de Energía (WEC, por sus siglas en inglés), presentó un listado de indicadores, que buscan ser útiles en la evaluación del grado de desarrollo sustentable que puede tener un país, en la bibliografía no se presentan unidades para su evaluación, por lo que se incluyen las posibles unidades en que algunos indicadores podrían ser evaluados cuantitativamente:

Tabla 2.2: Indicadores de Sustentabilidad del WEC<sup>9</sup>

La prosperidad del país (PIBpc)	Esperanza de vida (años)
Disposición de los suministros de alimentos (Kg <sub>pc</sub> )	Accesibilidad a la energía comercial (POB)
Casas con servicios modernos de energía (#)	Número de casas con drenaje público
Casas con la recolección de residuos (#)	Energía atómica (KWh <sub>pc</sub> /año)
Cambio del clima (Ton GEI/año)	Subsidios al costo de energía (\$/KWh)
Uso de carbón, aceite y gas natural (Ton <sub>pc</sub> /año)	Uso de hidroelectricidad (KWh <sub>pc</sub> /año)
Uso de energías renovables (KWh/año)	Erradicación de la pobreza (# pobres)
Uso tradicional de leña, bagazo (Ton/año)	Precios del servicio de energía eléctrica
Calidad de servicios de energía (apagones/año)	Mejoras del rendimiento energético
Congestión de camino (autos /1.000 habitantes)	Contaminación industrial del suelo (Km <sup>2</sup> )
Eficacia de combustibles en vehículos (L/100 km)	Lluvia ácida (pH)
Calidad urbana del aire (µg/m <sup>3</sup> )	Promoción de tecnologías (USD/año)
La distancia total al trabajo (Km/habitante*día)	
Pérdida de tierra por desarrollo (Km <sup>2</sup> construcción)	
Medidas para contener emisiones de gases invernadero (\$/Ton CO <sub>2</sub> )	

<sup>8</sup> OLADE/CEPAL/GTZ, *Energía y Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe: Enfoques para la política energética*, Quito, Mayo de 1997

<sup>9</sup> World Energy Council: *Living in One World*. Annex 1. 2001

Los indicadores buscan caracterizar situaciones referentes a las distintas dimensiones de sustentabilidad, su evaluación puede ser dada en un plano subjetivo, como lo propone el WEC (alto, medio, bajo), o bien puede ser evaluado cuantitativamente buscando asignar un valor a cada indicador en sus diferentes unidades físicas de medida, lo cual puede llevarnos a un estudio más profundo donde se requiere de una recolección de información más completa (el cual no es un objetivo de este trabajo).

Los indicadores de desarrollo sustentable son herramientas flexibles, aplicables y modificables a las condiciones de los países que busquen desarrollar sus propios programas nacionales usándolos para medir su progreso hacia sus objetivos nacionales de desarrollo sustentable.

La cumbre de la tierra de 1992 reconoció el importante papel que pueden jugar los indicadores ayudando a los países a tomar decisiones concientes sobre el desarrollo sustentable.

La ONU, en el documento "Indicadores de desarrollo sustentable: guía y metodologías" da una canasta de indicadores dividida en cuatro dimensiones, buscando generar una guía en las decisiones hacía el desarrollo sustentable de distintos países:

Tabla 2.3: **Indicadores de Sustentabilidad de la ONU<sup>10</sup>.**

SOCIAL		
Tema	Sub-tema	Indicador
Equidad	Pobreza	Porcentaje de población viviendo bajo la línea de pobreza
		Índice Gini de inequidad de ingreso
		Tasa de desempleo
	Igualdad de Genero	Tasa de salario de mujeres / Salario de hombres
Salud	Nivel Nutricional	Nivel nutricional de la niñez
	Mortalidad	Tasa de mortalidad bajo los 5 años de edad
		Esperanza de vida al nacimiento
	Sanidad	Población con sistema de drenaje apropiado (%)
	Agua Potable	Población con acceso a agua potable segura (%)
	Salubridad	Población con acceso a servicios médicos básicos (%)
		Inmunización de enfermedades infecciosas de la niñez
		Principal método anticonceptivo empleado
Educación	Nivel Educativo	Niños con grado 5° de educación primaria
		Nivel educacional secundario alcanzado por adulto
	Alfabetización	Grado de adultos alfabetizados
Vivienda	Condiciones de Vida	Área de piso de vivienda por persona
Seguridad	Crímenes	Número de crímenes /100,000 habitantes
Población	Cambio Poblacional	Tasa de crecimiento poblacional
		Número de asentamientos urbanos formales e informales

<sup>10</sup> UN Department of Economic and Social Affairs: Division for Sustainable Development Indicators of sustainable development: Guidelines and methodologies -2001

INSTITUCIONAL		
Tema	Sub-tema	Indicador
Estructura Institucional	Implementación de Desarrollo Sustentable	Estrategias nacionales de desarrollo sustentable
	Cooperación Internacional	Implementación de acuerdos globales ratificados
Capacidad Institucional	Acceso a la Información	Numero de suscripciones al Internet por cada 1000 habitantes
	Infraestructura de Comunicación	Principales líneas de teléfono por cada 1000 habitantes
	Ciencia y Tecnología	Gasto en investigación y desarrollo (% de PIB)
	Preparación y Respuesta a Desastres	Pérdidas materiales y humanas debidas a desastres naturales

AMBIENTAL		
Tema	Sub-tema	Indicador
Atmósfera	Cambio Climático	Emisiones de gases de efecto invernadero
	Destrucción de la Capa de Ozono	Consumo de sustancias destructoras de la capa de ozono
	Calidad del Aire	Concentración en el aire de contaminantes ambiental en áreas urbanas
Tierra	Agricultura	Áreas de tierras cultivable
		Uso de fertilizantes
		Uso de pesticidas en la agricultura
	Bosques	Áreas forestales como porcentaje de tierra continental
	Desertificación	Intensidad de leña generada
	Urbanización	Tierra afectada por desertificación
Océanos, Mares y Costas	Zona costera	Concentraciones de algas en aguas costeras
		Porcentaje de la población total viviendo en áreas costeras
	Pesca	Pesca anual por especies mayores
Agua Fresca	Cantidad del Agua	Retiro anual de aguas subterráneas y superficiales agua como porcentaje del total del agua disponible
	Calidad del Agua	DBO en cuerpos de agua
		Concentración de coliformes fecales en agua fresca
Biodiversidad	Ecosistemas	Área de ecosistemas clave seleccionados
		Área protegidas (% área total)
	Especies	Abundancia de especies claves seleccionadas

ECONOMICO		
Tema	Sub-tema	Indicador
Estructura Económica	Desarrollo Económico	PIBpc
		Partida de inversión del PIB
	Comercio	Balance de comercio en bienes y servicios
	Posición Financiera	Tasa de deuda con respecto al PIB
Asistencia oficial de desarrollo dada o recibida (% PIB)		
Modelos de Producción y Consumo	Consumo Material	Intensidad en el uso de materia
	Uso de Energía	Consumo de energía por habitante
		Consumo de recursos renovables de energía (%)
		Intensidad en el uso de energía
	Manejo y Generación de Residuos	Generación de residuos sólidos industriales y municipales
		Generación de residuos peligrosos
		Generación de residuos radioactivos
		Rehúso y reciclado de residuos
Transporte	Distancia de viaje por habitante por modo de Transporte	

## 2.4 Renovabilidad de un Recurso

La renovabilidad de un recurso energético se puede determinar a partir del agotamiento de los recursos naturales que se están consumiendo. Una sociedad que busca ser sustentable tiene que hacer uso racional de sus recursos renovables buscando compensar los volúmenes de su consumo con la cantidad disponible del recurso.

La renovabilidad (R) de un recurso energético significa que el uso o consumo (U) de sus reservas (S) no puede ser mayor que su tasa de regeneración (G), y esa relación está dada por las siguientes expresiones<sup>11</sup>:

$$R_c(\%) = \frac{S}{U * G * \varphi} \quad \text{donde: } \varphi = \frac{\varepsilon^\circ}{PCI} \quad (1)$$

Donde  $\varphi$  es el cociente entre la energía aprovechable por unidad de materia (exergía,  $\varepsilon^\circ$ ) y la energía que el recurso puede llegar a liberar por unidad de materia, es decir, su poder calorífico inferior (PCI)<sup>12</sup>.

La renovabilidad como indicador es útil en la valoración de la canasta de combustibles que se desean utilizar a largo plazo, siendo un indicador de la disponibilidad de los combustibles como recursos naturales en el futuro. En la siguiente tabla se muestra la evaluación de este indicador para distintos combustibles:

<sup>11</sup> Cornelissen R, Van der Berg, *EcoChem, the new tool for process plants to calculate the sustainability based on exergy concept*. Proceeding of ECOS, Copenhagen, Denmark. 2003

<sup>12</sup> Nota: Szargut y Styrylska asumen que el cociente de exergía química ( $\varepsilon^\circ$ ) y el Poder Calorífico Inferior (PCI) para combustibles industriales sólidos y líquidos es el mismo que para sustancias puras, tienen el mismo cociente de sus constituyentes químicos puros. Fuente: Kotas T. J Op. Cit., p.267 (Ver anexo A:)

**Tabla 2.4: Valores de Renovabilidad para Diferentes Recursos Energéticos**

Energético	$\varphi$	S [ $10^6$ PJ]	G [años]	U [ $10^3$ PJ/año]	R <sub>c</sub> [%]
Recursos Mundiales		Reserva	Regeneración	Uso anual	Renovabilidad
Carbón	1.08	27	$10^7$	100	0.0025
Petróleo	1.06	6	$10^7$	150	0.0004
Gas Natural	1.04	5	$10^7$	85	0.0006
Uranio Enriquecido	1.00	17	$\infty$	268	0
Hidrógeno	0.985	$\infty$	?	5.5	100
Azufre (rombico) <sup>13</sup>	2.017	?	?	?	?

Fuentes: Elaboración con base en datos de: 1) Cornelissen, R L Op. Cit p.392. 2) Kotas T.J, The exergy method of the thermal plant analysis, Appendix C, p. 269. 3) Boletín No 1 de la Sociedad Mexicana de H<sub>2</sub>. 4) Del Fuego a la Energía Nuclear. CFE. CNLV. 2004. p 14. 5) www. World-nuclear.org (supply of uranium).

## 2.5 Eficiencia Exergética Sustentable

El indicador de *eficiencia exergética sustentable* tiene la finalidad de obtener una evaluación numérica de la sustentabilidad de un proceso o de una cadena de combustible. Una mayor sustentabilidad de un proceso será posible en la medida que las irreversibilidades del proceso sean disminuidas, sin embargo, en la realidad los procesos termodinámicos siempre son irreversibles, por ello la renovabilidad del recurso es un factor a considerar cuando se busca la diversificación de la canasta de recursos energéticos, a fin de tener distintas opciones de combustibles para la generación de energía. Una sociedad que busca ser sustentable tiene que hacer el uso de recursos renovables que compensen la irreversibilidad de los procesos y contribuyan al uso eficiente de la energía disponible.

La sustentabilidad de un proceso industrial se puede determinar desde un punto de vista energético como el agotamiento de los recursos naturales usados, bajo el uso del concepto de exergía<sup>14</sup>. Tomando como partida la definición Brundtland en donde se define al desarrollo sustentable como: “*un desarrollo que satisfaga las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias*”, y si las necesidades de la sociedad son traducidas a términos físicos como el potencial de hacer estos cambios, o potencial de hacer trabajo (exergía), así la definición de Brundtland se puede entender como el uso sustentable de los recursos exergéticos.

<sup>13</sup> Nota: En el caso del azufre la fuente (Kotas T.J) refiere que se omite el efecto energético de los enlaces químicos del azufre rombico, introduciendo una corrección sobre el efecto de éstos en la exergía ( $\varepsilon^\circ$ ) del combustible.

<sup>14</sup> **Exergía:** La exergía es el máximo potencial de trabajo útil disponible, puro o neto de un material o de una forma de energía en relación con su ambiente de referencia. A diferencia de la energía la exergía *se gasta o se pierde*, esto sucede a medida que se pierda la capacidad de hacer trabajo útil (generando entropía o irreversibilidades). La exergía también puede ser vista como una medida de la calidad de la energía.



En el análisis de procesos de producción de energía, combustibles o petroquímicos, la aplicación del concepto de *sustentabilidad exergética* del proceso, evaluado mediante la *eficiencia exergética sustentable* ( $\eta_{eco\ sus}$ ), requiere del análisis de la cadena completa para la producción del recurso energético. Por ello es indispensable contar con la descripción de dicho proceso en términos de los consumos de energía útil para su obtención, o bien en términos de sus factores de costo exergético.

La eficacia exergética se define como:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (2)$$

y puede ser rescrita, en términos de la pérdida de exergía ( $I$ ) de las siguientes formas:

$$I = E_{in} - E_{out} \quad (3)$$

$$\eta_{ex} = \frac{(E_{in} - I)}{E_{in}} \quad (4)$$

$$\eta_{ex} = \frac{I}{1 + \frac{I}{E_{out}}} \quad (5)$$

Si la pérdida de exergía, es puesta en términos de recursos *no-renovables*, tenemos:

$$I_{no-renovable} = \sum_i E_{in,no-renovable}^i (1 - \eta_{ex}) \quad (6)$$

$$I_{no-renovable} = \sum_i E_{in}^i (1 - R_{c_i})(1 - \eta_{ex}) \quad (7)$$

Así, para el cálculo de la *eficiencia exergética sustentable* tenemos la ecuación:

$$\eta_{eco\ sus} = \frac{1}{1 + \frac{\sum_i E_{in,no-renovable}^i (1 - \eta_{ex})}{E_{out}}} \quad (8)$$

En la cual están contempladas la exergía no-renovable, y la reversibilidad del proceso. Cuando se utilizan recursos no-renovables la *eficiencia exergética sustentable* ( $\eta_{eco\ sus}$ ) equivale a la eficiencia exergética ( $\eta_{ex}$ ).

$$\eta_{eco\ sus} = \frac{1}{1 + \frac{\sum_i E_{in,no-renovable}^i (1 - \eta_{ex})}{E_{out}}} = \frac{E_{out}}{E_{out} + E_{in} \cdot (1 - \eta_{ex})} = \frac{E_{out}}{E_{out} + E_{in} \cdot (1 - \frac{E_{out}}{E_{in}})} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \eta_{ex}$$

Cuando  $R_c = 0$ , entonces:  $\eta_{ex} = \eta_{eco\ sus}$

A medida que se disminuya el uso de recursos renovables en los procesos que se evalúen, la *eficiencia exergética sustentable* será más cercana a la *eficiencia exergética*.

Para la determinación de la sustentabilidad de un proceso desde el punto de vista termodinámico se deben de considerar también las pérdidas a lo largo de la cadena de producción de las materias alimentadas al proceso, por lo que se incluye el factor de costo exergético ( $k$ ), el cual se considera para cada uno de los insumos entrantes al proceso y el cual se introduce para la cadena completa de la siguiente forma:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{out}}{\sum_i k_i E_{in}} \quad (9)$$

Por lo que finalmente la evaluación de la cadena completa queda definida bajo la siguiente ecuación de *eficiencia exergética sustentable* ( $\eta_{eco\ sus}$ ):

$$\eta_{eco\ sus} = \frac{1}{1 + \frac{\sum_i k_i E_{in, no-renovable}^i (1 - \eta_{ex, cadena})}{E_{out}}} \quad (10)$$

Para esta ecuación podemos describir las siguientes propiedades:

1. El valor de eficiencia es la unidad en el caso de que el proceso sea reversible (lo cual no es posible) o en la medida que el proceso utilice solamente recursos energéticos renovables.
2. El valor es cero en caso de un proceso disipativo, que significa que no hay producto útil en términos exergéticos.
3. El valor del indicador cercano a la unidad a medida que se incremente el uso de los recursos energéticos renovables.
4. Cuando no se utilizan recursos renovables, el valor de *eficiencia exergética sustentable* es igual a la *eficiencia exergética*

## 2.6 Efecto Invernadero y el Calentamiento Global del Planeta

El calentamiento de la atmósfera terrestre es un fenómeno natural resultante de la interacción de los procesos naturales de intercambio de radiación electromagnética entre el sol (fuente generadora) y la radiación térmica del planeta Tierra (cuerpo receptor, evaporador y reflector de la energía recibida por la fuente generadora).

La Tierra absorbe la radiación del Sol, sobre todo en la superficie. Esta energía es redistribuida luego por las circulaciones atmosférica y oceánica, y es irradiada nuevamente al espacio en longitudes de onda más largas (infrarrojas). Para la media anual y para la Tierra en su conjunto, la energía de la radiación solar que ingresa se equilibra aproximadamente con la radiación terrestre saliente. Cualquier factor que altere la radiación recibida del Sol o perdida en el espacio, o que altere la redistribución de energía dentro de la atmósfera y entre atmósfera, tierra y océano, puede afectar el clima. Un cambio en la energía radiante neta disponible para el sistema mundial de Tierra-atmósfera se denomina forzamiento radiativo. Los forzamientos radiativos positivos tienden a calentar la superficie de la Tierra y la atmósfera inferior. Los forzamientos radiativos negativos tienden a enfriarlas<sup>15</sup>.

Los aumentos en las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI o GHG por sus siglas en inglés) reducen la eficiencia con la cual la superficie de la Tierra irradia energía al espacio. La atmósfera absorbe más radiación terrestre que se desprende de la superficie y vuelve a emitirla en altitudes superiores y temperaturas más bajas. Así se produce un forzamiento radiativo positivo que tiende a calentar la atmósfera inferior y la superficie. Como se desprende menos calor hacia el espacio, se refuerza el efecto invernadero, es decir que se intensifica un efecto que ha ocurrido en la atmósfera de la Tierra durante miles de millones de años, debido a la presencia de GEI que se producen naturalmente: vapor de agua, bióxido de carbono, ozono, metano y óxido nitroso. La cantidad de forzamiento radiativo depende de la magnitud del aumento en la concentración de cada GEI, de las propiedades radiativas de los gases en cuestión y de las concentraciones de otros GEI ya presentes en la atmósfera. Además, muchos GEI permanecen en la atmósfera durante siglos después de haber sido emitidos, introduciendo así un compromiso a largo plazo de forzamiento radiativo positivo<sup>16</sup>.

La revolución industrial marcó el inicio de la intensificación de la emisión de GEI's de origen antropogénicos hacia la atmósfera, este suceso dio marcha al rompimiento progresivo del invernadero natural de la tierra, provocando la acentuación del calentamiento térmico de la baja atmósfera terrestre<sup>17</sup>. Al fenómeno se le dio el nombre de Calentamiento Global (Global Warming); más tarde, debido a la similitud de los procesos que se producen en la atmósfera del planeta con los invernaderos construidos por el hombre para el cultivo de plantas y alimentos fue rebautizado como Efecto Invernadero (Greenhouse Effect), y es entendido como el *proceso de absorción (almacenamiento) de la radiación infrarroja por los distintos gases presentes en la atmósfera*.

<sup>15</sup> IPCC. *La base científica*. Op. Cit., p. 20

<sup>16</sup> Id.

<sup>17</sup> United Nations Environment Programme, 1997.

## 2.7 Potenciales de Calentamiento Global (GWP)

El Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés), es una medida del efecto radiactivo de una masa de gas de efecto invernadero<sup>18</sup> comparada con el de la misma masa de CO<sub>2</sub>, (el GWP del CO<sub>2</sub> = 1), la medida está integrada dentro de un horizonte de tiempo que comprende la duración o "vida" de la molécula en el aire, sin ser removida por mecanismo, ciclo natural, o reacción química. Algunos de los valores del GWP tienen grande incertidumbre, particularmente en aquellos gases para los cuales no se ha determinado el tiempo de vida de forma detallada en el laboratorio.

El volumen de las emisiones es tan sólo un indicador cuantitativo de la presencia de los gases en la atmósfera, pues la contribución efectiva de cada sustancia al calentamiento global debe ponderarse por el peso molecular, por el tiempo de permanencia medio en la atmósfera y por el efecto de calentamiento acumulativo de cada gas. La ponderación de todos estos factores va a suministrar el Poder de Calentamiento Global calculado por el IPCC en la siguiente tabla:

Tabla 2.5: Potenciales de Calentamiento Global

Fórmula Condensada del Gas	Acción relativa *
CO <sub>2</sub>	1 (referencia)
CH <sub>4</sub>	23
N <sub>2</sub> O	296
SF <sub>6</sub>	22, 200
CF <sub>4</sub>	5, 700
CHF <sub>3</sub>	12, 000
CH <sub>3</sub> F	97

\*Para un horizonte de vida de 100 años de molécula.

Fuente: IPCC 2001. Op. Cit., p. 45 (Ver Anexo A10)

Una unidad de un gas fluorocarbonado puede tener un GWP miles veces mayor que la misma unidad de CO<sub>2</sub>, pero las grandes diferencias en la concentración del CO<sub>2</sub> en la atmósfera dan una contribución real al efecto invernadero aproximadamente del 55%<sup>19</sup>, otros gases como el monóxido de carbono y los compuestos orgánicos volátiles (COV) son responsables *del efecto invernadero indirecto* por su influencia en la formación de ozono, y en los períodos de vida del CH<sub>4</sub> y otros GEI's.

<sup>18</sup> Los gases generados por la actividad humana que provocan el *efecto invernadero* según el anexo 1 del protocolo de Kyoto son el CO<sub>2</sub> (bióxido de carbono), CH<sub>4</sub> (metano), N<sub>2</sub>O (Oxido Nitroso), HFC (Hidroflorocarbonos), PFC (Perflurocarbonos) y SF<sub>6</sub> (Hexafluro de azufre) y vapor de agua.

<sup>19</sup> Apud. Wang, App. B-II, GHG emissions from advanced automotive technologies and alternative fuels. 1999

## 2.8 La Generación Antropogénica de Gases de Efecto Invernadero

La atmósfera terrestre está compuesta básicamente por dos componentes químicos, el Oxígeno (O<sub>2</sub>) y el Nitrógeno (N<sub>2</sub>), que sumados alcanzan cerca del 99% de su volumen total. En segundo plano con cerca del 0.9%, está el Argón (Ar); el restante 0.1% está distribuido entre los demás gases, inclusive los causantes del efecto invernadero.

Los gases que se producen en la atmósfera como trazas, tienen un alto potencial de interacción con otros elementos químicos y con la radiación infrarroja y se pueden clasificar como gases de origen natural o de origen antropogénico.

Durante el pasado geológico de nuestro planeta, diversas fuentes naturales de gases de efecto invernadero proporcionaron la manutención de las condiciones de temperatura en la superficie terrestre. Donde se encuentran el vapor de agua (el más importante de los componentes naturales del efecto invernadero) que con el cielo claro, causa alrededor del 60-70% del efecto invernadero natural a nivel troposferico<sup>20</sup>, siendo las fuentes naturales (evaporación, volcanes, ente otros), su contribución más significativa. También se tiene al bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que naturalmente es adicionado a la atmósfera, principalmente a través de las explosiones volcánicas y por procesos de respiración celular de los organismos vivos.

La tabla siguiente sintetiza, para los principales gases causantes del efecto invernadero, la evolución de los niveles de concentración, desencadenados por el aumento de la actividad industrial.

Tabla 2.6: Índices de Concentración de GEI's en la Atmósfera

Índice	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CFC-11	N <sub>2</sub> O
1750-1800	280 ppmv	0,8	0	288 ppbv
Nivel actual	353 ppmv	1,72 ppmv	280 pptv	310 ppbv
Tasa de crecimiento actual	0,50%	0,90%	4%	0,25%
Vida media en la atmósfera (años)	50-200	10	65	150

Fuente: United Nations Environment Programme, (UNEP) 1997.

## 2.9 Características de Algunos Contaminantes Gaseosos del Aire

### 2.9.1 Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono es más ligero que el aire y altamente difuso, es originado por las combustiones deficientes del carbón, gas natural y el petróleo y sus derivados, por incendios de bosques, minas y campos de cultivo, por procesos industriales y disposición de desechos sólidos, entre otras. El CO es un gas que desplaza al O<sub>2</sub> de los sitios activos en la hemoglobina durante la respiración y ya adherido es retenido 200 veces más fuerte que el O<sub>2</sub>. Los cálculos indican que la emisión de 100 Mt de CO es equivalente, en términos de perturbaciones que provocan los GEI, a la emisión de alrededor de 5 Mt de CH<sub>4</sub><sup>21</sup>.

<sup>20</sup> (IPCC, 1995). p. 37

<sup>21</sup> Id, *La base científica*.2001., p. 20

## 2.9.2 Bióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

El bióxido de carbono constituye apenas el 0.035 v/v de la atmósfera terrestre, sin embargo, juega un papel crítico en el control del clima, puesto que tanto el CO<sub>2</sub> como el vapor de agua pueden absorber mucha de la radiación de grandes longitudes de onda salientes de la superficie terrestre, afectando el balance térmico global de la tierra. La concentración de CO<sub>2</sub> ha ido en aumento constante desde principios del siglo pasado por el uso intensivo de los combustibles fósiles, con una velocidad de 0.3-0.4%/año, lo que equivale a 9X10<sup>9</sup> toneladas de CO<sub>2</sub>. Estimándose que en el año 2000 la concentración fue 25% mayor que los niveles preindustriales (290 ppm)<sup>17</sup>. Como el CO<sub>2</sub> es químicamente inerte, éste no es destruido por procesos fotoquímicos o químicos en la atmósfera, pero puede ser movido por su fijación natural en los lechos de los océanos (4X10<sup>15</sup> g/año) o por la fotosíntesis en las plantas (10<sup>15</sup> g/año).

El CO<sub>2</sub> es el principal gas emitido a la atmósfera por la actividad humana debido principalmente a la quema de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica y el transporte. La tabla siguiente muestra los procesos naturales de fijación o secuestro por medio de los cuales el CO<sub>2</sub> es removido de la atmósfera:

Tabla 2.7: Promedio Anual de Carbono Removido por la Actividad Humana (1980-89)

Concepto	Cantidad (GtC/año)
<b>CO<sub>2</sub> Fuentes</b>	
1 Combustión de fuentes fósiles y producción de cemento	5.0-6.0
2 Cambios en el uso de la tierra tropical (deforestación)	0.6-2.6
3 Emisiones totales por actividad humana (1+2)	6.0-8.2
<b>CO<sub>2</sub> Secuestro</b>	
4 Presente en la atmósfera	3.1-3.5
5 Absorción de océanos	1.2-2.8
6 Reverdecimiento de Hemisferio septentrional	0.0-1.0
7 Secuestro o Fijación inferida 3-(4+5+6)	-0.2-2.8

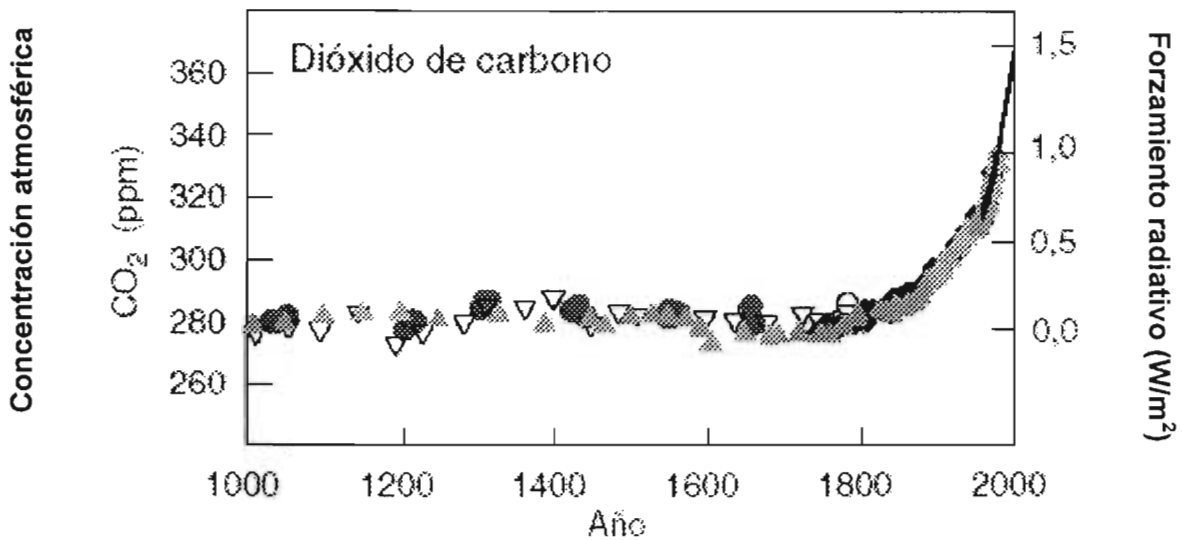
GtC = 10<sup>9</sup> toneladas de carbón.

Fuente: IPCC, 1996.

El CO<sub>2</sub>, tiene un tiempo grande de vida en la atmósfera de 50 a 200 años (dependiendo sobre qué tiempo de fijación se determine su remoción). La actividad humana sólo genera una fracción del CO<sub>2</sub> colocado en el ciclo del carbono pero esto es suficiente para alterar la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

La concentración de CO<sub>2</sub> se ha incrementado de 280ppmv, después de la revolución industrial a 358 ppmv en 1994. La concentración de CO<sub>2</sub> ha sido monitoreada en Mauna Loa, Hawaii desde 1958. Los resultados se muestran en la Gráfica 2.3, que muestra el incremento regular en las concentraciones de bióxido de carbono en su comportamiento estacional.

Gráfica 2.3: Evolución de la Concentración Atmosférica de CO<sub>2</sub>



Fuente: IPCC, 2001. Op. Cit., p.5

#### Aumento de la Concentración de CO<sub>2</sub> en la Atmósfera:

Los estudios sobre escenarios de emisión de gases de efecto invernadero están ampliamente diseminados. El más utilizado para promover estudios sobre posibles alteraciones climáticas de carácter global es el del IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental sobre Cambios Climáticos).

El IPCC, fue establecido en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) para evaluar la información científica, técnica y socioeconómica disponible en el campo del cambio del clima. El IPCC está organizado en tres grupos de trabajo: el Grupo de Trabajo I se concentra en el sistema del clima, el Grupo de Trabajo II en impactos y opciones de respuesta y el Grupo de Trabajo III en la dimensión socioeconómica.

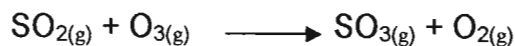
El escenario más optimista del IPCC asume que la población mundial en el año 2010 será de 6,400 millones y que la economía crecerá a una tasa media de un 2% al año hasta el 2025. De acuerdo con estas previsiones, las emisiones de CO<sub>2</sub> crecerán de 7.4 hasta 8.8 Gton/año en el 2025 y deberán disminuir a 4.6 GT/año en el 2100. Actualmente, la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera corresponde a 360 ppm, adoptándose la hipótesis de un crecimiento de las emisiones del escenario optimista, la concentración de CO<sub>2</sub> llegaría a 700 ppm en el año 2100.

El escenario más pesimista asume que la población mundial crecerá hasta los 13,100 millones de habitantes y que la economía se situará en una tasa de crecimiento del 3% al año durante el próximo siglo. De esta manera, las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentarían a 15.1 GT/año en el 2025 a 35.8 GT/año en el 2100.

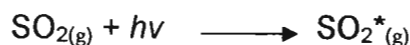
### 2.9.3 Bióxido de Azufre SO<sub>2</sub>

Los problemas ambientales asociados al uso de combustibles de origen fósil son las emisiones de gases contaminantes generados durante su combustión, tales como el Bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) proveniente de los compuestos que contienen azufre en el combustible empleado. Este proceso conduce a la formación de la *lluvia ácida* cuyo mecanismo químico es descrito a continuación<sup>22</sup>.

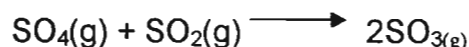
Parte del SO<sub>2</sub> se oxida en el aire por varios procesos, por ejemplo, reaccionando con el ozono:



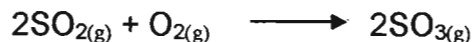
Por otro lado, una molécula de SO<sub>2</sub> puede ser fotoexcitada por la luz del sol:



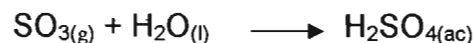
Y se desencadenan las siguientes reacciones, donde la especie SO<sub>4</sub> es un intermediario:



En otra serie de reacciones, el polvo y otras partículas sólidas presentes en la atmósfera pueden actuar como catalizadores heterogéneos de la reacción:



Finalmente el SO<sub>3</sub> se convierte en su ácido correspondiente con el agua de lluvia.



Los ácidos resultantes pueden corroer construcciones hechas de piedra caliza y mármol (CaCO<sub>3</sub>), la lluvia ácida también es perjudicial para la vida vegetal y acuática, se han documentado casos en los cuales la lluvia ácida ha destruido tierras de cultivo y forestales, y matado peces en los lagos.

Hay dos formas de reducir los efectos de la contaminación por SO<sub>2</sub>. La manera más directa es quitar el azufre de los combustibles fósiles antes de su combustión.

---

<sup>22</sup> Chang. R. Química, Mc Graw Hill. 1992.



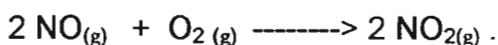
#### 2.9.4 Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>: NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O)

El nitrógeno es el elemento más abundante en el aire y está presente en toda reacción de combustión con oxígeno atmosférico. Los óxidos de nitrógeno son producidos naturalmente durante las reacciones de combustión a altas temperaturas, durante las descargas de rayos en las partes altas de la atmósfera, durante la oxidación del amonio en la actividad de descomposición microbiana del suelo. La generación antropogénica de los óxidos de nitrógeno se produce principalmente durante las reacciones de combustión en motores, en la generación de energía eléctrica con combustibles fósiles, en la fabricación de vidrio, ácido nítrico, refinerías y por el uso de fertilizantes.

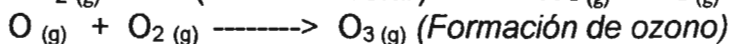
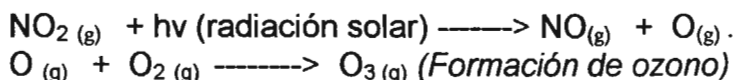
El nitrógeno no reacciona fácilmente con el oxígeno (por eso el aire se mantiene como una mezcla fija) pero en condiciones favorables de temperatura y concentración reaccionan produciendo los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) que son el óxido nítrico (NO), el bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y su dímero químico: el tetróxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>).

El NO<sub>2</sub> y el NO son peligrosos para la salud, estudios de mortalidad indican que el NO<sub>2</sub> es cuatro veces más tóxico que el NO; en función de su concentración pueden llegar a afectar el tracto respiratorio, irritación nasal, dolores respiratorios agudos, edema pulmonar e inclusive llegar a causar la muerte.

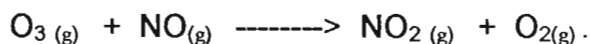
El monóxido de nitrógeno se transforma en bióxido de nitrógeno en el aire:



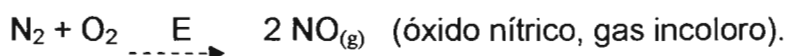
El bióxido de nitrógeno se descompone por la acción de la luz solar en óxido nítrico y oxígeno atómico (éste último muy reactivo) y reacciona con una molécula de oxígeno produciendo ozono, procesos que se representan como:



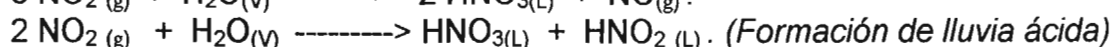
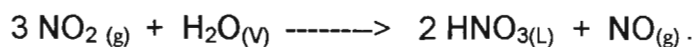
El ozono, por su parte al igual que los demás peróxidos es muy reactivo y reacciona con el óxido nítrico produciendo bióxido de nitrógeno y oxígeno.



Las reacciones químicas directas del nitrógeno generalmente requieren altas temperaturas, debido a su poca reactividad química:



El bióxido de nitrógeno se combina con el agua produciendo ácido nítrico y óxido nítrico o ácido nítrico y ácido nitroso, según la cantidad de bióxido de nitrógeno que reaccione con el agua:



### 2.9.5 Smog Fotoquímico

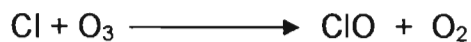
El smog es una mezcla química de gases: óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), compuestos volátiles orgánicos (VOC), bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>) y aerosoles, así como partículas de materia que forman parte de esta bruma. Los gases que lo causan provienen de las industrias, de los automóviles e incluso de los hogares, como resultado de procesos de combustión.

Se denomina smog fotoquímico a la contaminación del aire por un gas de color *marrón rojizo*. Este tipo de smog se describió por primera vez en Los Ángeles en los años 40, y se suele dar en ciudades con bastante tráfico (emisión de óxido nítrico, NO, y compuestos orgánicos volátiles, COVs), cálidas y soleadas, y con poco movimiento de masas de aire.

El NO<sub>2</sub> es un gas de color *marrón rojizo*. Cuando el nivel en los gases de chimenea supera los 20 ppm de NO<sub>2</sub>, adquiere un color anaranjado. En general los denominados NO<sub>x</sub> son una mezcla de NO, NO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O.

### 2.8.6 Impacto de Refrigerantes.

Los clorofluorocarbonos son producto de la actividad industrial y se usaban como gases refrigerantes (aire acondicionado, frigorífico), o en los aerosoles, a pesar de ser inertes en los seres vivos su velocidad de migración a la atmósfera es directamente proporcional a la velocidad de su fabricación y uso. Los clorofluorocarbonos tienen un alto potencial en los índices de calentamiento global del planeta, pues cuando el gas asciende en la estratosfera, las moléculas del freón reaccionan con los fotones de radiación UV con longitudes de onda en el intervalo 185 y 227nm desintegrándose y liberando cloruros que dan lugar a las siguientes reacciones de desintegración del ozono troposférico (O<sub>3</sub>), que es vital en el mantenimiento del efecto invernadero natural del planeta:



Como se puede observar la emisión de clorofluorocarbonos propicia una serie de reacciones en cadena que tienen un alto impacto en el daño al ozono troposférico, estos compuestos han sido sustituidos por compuestos que no contienen cloro, que se consideran una solución temporal pues no llegan a la estratosfera, por que una buena parte de las emisiones se oxida en la baja atmósfera, ya que no son tan inertes como los CFC's, otros compuestos son los hidrofurocarbonos HFC que son químicamente parecidos a los CFC, pero también sin cloro.

En general los compuestos halogenados (con elementos del grupo VIIA de la tabla periódica) presentan altos valores de GWP en las diferentes variedades de refrigerantes (ver anexo A10) tales como: clorofluorocarbonados, hidrofluorocarbonos, éteres halogenados y compuestos gaseosos con flúor, teniendo su caso extremo con el hexafluoruro de azufre, que presenta el valor más alto de GWP, sin embargo, los refrigerantes no son gases de efecto invernadero pero como se mencionó sí contribuyen a la destrucción de la capa de ozono.

### 2.9.7 Metano (CH<sub>4</sub>)

El metano es producido a través de procesos de descomposición anaeróbica o por combustión incompleta, por cambios en el uso del suelo y áreas naturales pantanosas; cría de animales, utilización energética (producción, almacenado, combustión de carbón mineral y producción y transporte de gas natural). El gas natural como combustible tiene un fácil mezclado con el aire, lo que favorece su combustión completa y disminuye la cantidad de CO emitido a la atmósfera. Una vez procesado, queda libre de azufre, prácticamente no emite óxidos de nitrógeno y la liberación de hidrocarburos es casi nula.

### 2.10 Factores de Emisión.

Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad. En general, los factores de emisión se clasifican en dos tipos: los basados en procesos y los basados en censos. Por lo común los primeros se usan para hacer estimaciones de las emisiones de fuentes puntuales, y a menudo se combinan con los datos de actividad recopilados con encuestas o con balances de materiales. Por otra parte, los factores de emisión basados en censos, se usan mucho para hacer estimaciones de las emisiones de fuentes de un área específica<sup>23</sup>.

La fuente de consulta más extensa para factores de emisión basados en procesos, específicos para los Estados Unidos, es el documento *AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors* (U.S. EPA, January 1995a). La referencia principal para factores de emisión de contaminantes tóxicos del aire es el sistema de datos FIRE (U.S. EPA, 1995b).

En el documento de guía: *Rapid Source Inventory Technique*, preparado para la OMS (Economopoulos, 1993) se encuentran factores de emisión no específicos para los Estados Unidos para diversos conjuntos de fuentes. Este tipo de factores también se hallan en documentos de guía para inventarios de gases de invernadero (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 1993a y b). Ambos documentos se encuentran resumidos en las tablas A14 y A15 de los anexos.

---

<sup>23</sup> Radian Corporation, *Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México, Volumen III - Técnicas Básicas de Estimación de Emisiones*. CA. USA. 1996. p.21

## 2.11 Concepto de Equivalente de Bióxido de Carbono

Para la evaluación del impacto ambiental que tiene la generación de energía eléctrica mediante las emisiones de gases contaminantes hacia la atmósfera se define el “*equivalente de bióxido de carbono*”<sup>24</sup> [(CO<sub>2</sub>)<sub>e</sub>] compuesto por los contaminantes gaseosos generados en la combustión de materiales fósiles como carbón, combustóleo, gas natural o diesel y que actualmente están regulados por las Normas Oficiales Mexicanas: NOM-085-ECOL-1994 y la NOM-021-SSA1-1993.

En México no existen normas de emisión de CO<sub>2</sub> para fuentes fijas, sin embargo, la normatividad actual sí establece estándares límites para las emisiones de gases NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO y partículas por unidad de volumen de aire. El valor numérico de estos estándares dependerá de la rigurosidad de la normatividad de cada país (Tabla 2.8), en el caso del CO<sub>2</sub> no existe un estándar de emisión para este gas, sin embargo, existe un incipiente mercado de certificados de emisiones de CO<sub>2</sub> que las penalizan por sus efectos en el clima y promueven su reducción. En este trabajo se considerará la máxima concentración de CO<sub>2</sub> aceptable en el aire de 10,000 mg/m<sup>3</sup>, propuesta por Cardu<sup>xi</sup>, y a partir de ésta se determinan los coeficientes para la mezcla de gases contaminantes en su *equivalente de bióxido de carbono* para la legislación ambiental respectiva en cada país, mediante la división del estándar ambiental de los diferentes contaminantes entre el máximo valor permitido para el bióxido de carbono, convirtiéndose de esta manera en la referencia de equivalencia para distintos contaminantes gaseosos.

Tabla 2.8: Estándares de Calidad Ambiental en Distintos Países [mg/m<sup>3</sup>]

Gas	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>			NO <sub>x</sub>			PST		CO
Estándar ambiental	10000 <sup>xi</sup>	200	233	1436	150	206	267	150	60	12.6
País		A	J	M	A	M	J	B	M	M
Coefficiente*	1	50	43	7	67	50	81.3	67	167	794

PST: Partículas Suspendidas Totales, A: Australia, J: Japón, M: México, B: Brasil.

Fuentes: 1) NOM-085-ECOL-1994, 2) National Environmental Concil\_Brazil, 3) NOM-021-SSA1-1993

\* El coeficiente es adimensional.

Para una evaluación del impacto ambiental por contaminantes legislados localmente, y generados por la quema de combustibles, el *equivalente de bióxido de carbono* [(CO<sub>2</sub>)<sub>e</sub>], considera los volúmenes de contaminantes gaseosos generados en la combustión de materiales fósiles como carbón, combustóleo, gas natural o diesel. A continuación se presenta el indicador de forma comparativa para México y Brasil.

$$\text{México: } (CO_2)_e = (CO_2) + 7(SO_x) + 50(NO_x) + 167(PST) + 794(CO) \quad (11)$$

Bajo Normas Oficiales Mexicanas.

$$\text{Brasil: } (CO_2)_e = (CO_2) + 80(SO_x) + 50(NO_x) + 67(PST) \quad (12)$$

Bajo el Consejo Nacional Medioambiental de Brasil

<sup>24</sup> Cárdu M, & Baica M. Regarding a global methodology to estimate the energy-ecologic efficiency of thermopower plants. *Energy Conversion & Management* 1999; (40): 71-87

El término  $[(CO_2)_e]$  tiene unidades  $[kg\ CO_2/ Kg\ F]$ , y también las concentraciones de cada uno de los contaminantes considerados en la ecuación, ya que los coeficientes que multiplican a cada factor son adimensionales<sup>25</sup>.

El equivalente de bióxido de carbono también puede considerar mejoras en la calidad de los combustibles empleados a través de tecnologías con diferentes eficiencias en los procesos de desulfurización ( $\sigma_s$ ), denitrificación ( $\sigma_n$ ), demetalización ( $\sigma_M$ ) o de eliminación de carbón residual ( $\sigma_{PS}$ ) obteniendo con ello una reducción en el valor final del equivalente de bióxido de carbono y una mejora desde el punto de vista ecológico.

La siguiente ecuación es aplicable a una chimenea donde se pueden realizar mejoras en la reducción de los volúmenes de contaminante emitido, por lo que el valor  $\sigma_x$  de cualquier contaminante será la fracción en la que se reducen los volúmenes de emisiones.

$$(CO_2)_e = (1-\sigma_c)(CO_2) + 7(1-\sigma_s)(SO_x) + 50(1-\sigma_n)(NO_x) + 167(1-\sigma_{ps})(PST) + 794(1-\sigma_{co})(CO)$$

La siguiente tabla muestran los procesos para los cuales se abrevia  $\sigma_x$ , a fin de establecer una nomenclatura para identificar los procesos de reducción de componentes que pueden generar compuestos gaseosos contaminantes:

Tabla 2.9: Nomenclatura para el Control de Emisiones en Procesos Industriales

Proceso	Contaminante	$\sigma_x$ (w/w)
DS (Desulfurización)	SO <sub>2</sub>	$\sigma_s$
DN (Denitrificación)	NO <sub>x</sub>	$\sigma_n$
HDCCR <sup>26</sup> (Desintegración Carbón Residual)	Cenizas, Asfáltenos	$\sigma_{ps}$
DM (Demetalización)	Metales	$\sigma_M$
CO <sub>2</sub> C (Captura de CO <sub>2</sub> )	CO <sub>2</sub>	$\sigma_{CO_2}$
PC Pos-combustión	CO	$\sigma_{CO}$

## 2.12 Eficiencia Ecológica de Emisiones Gaseosas

La *eficiencia ecológica* de emisiones gaseosas es un indicador que ofrece la posibilidad de combinar la *eficiencia térmica* de una central y la relación con su impacto en el medio ambiente. Está basado en dos consideraciones principales: 1) El daño que genera el contaminante gaseoso mediante los *estándares de emisión* permitidos en la legislación ambiental vigente de cada país, teniendo la flexibilidad para adecuarse a los cambios en ésta y modificar su estructura para la inclusión de más contaminantes y 2) la correspondencia de las emisiones con las unidades de energía útil producida en términos de *eficiencia térmica del proceso* y volumen de combustible consumido.

<sup>25</sup> Análisis dimensional de la ecuación:  $(CO_2)_e = \frac{[Kg\ contaminante]}{año} / \frac{[Kg\ combustible]}{año} = \left[ \frac{Kg\ contaminante}{Kg\ combustible} \right]$

<sup>26</sup> Micro-carbón residual (Ramsbottom y Conradson): El micro-carbón residual, las Prueba Ramsbottom y Conradson son tres métodos de prueba para determinar el carbono residual formado durante la combustión del diesel, combustóleo, o asfaltos bajo un reducido suministro de aire, el residuo contiene partículas de combustible que no fueron completamente quemadas y también ceniza generada por el combustible por su combustión.

La metodología fue propuesta por Cardu<sup>27</sup> en el año de 1997 y ha sido utilizada por otros autores<sup>28</sup>, para aplicarla a diferentes procesos y sistemas.

La *eficiencia ecológica de emisiones gaseosas* toma en consideración dos combustibles virtuales, el azufre y el hidrógeno, tratándolos como los casos límite (tabla 2.10), para compararlos contra el indicador de “equivalente de bióxido de carbono”  $[(CO_2)_e]$ , que es normalizado y puesto en una escala porcentual cuando se traduce en términos de eficiencia como lo veremos a continuación:

El indicador de *eficiencia ecológica* busca expresar el impacto de todos los componentes gaseosos dañinos, contenidos en las emisiones a la atmósfera producidas por quema de combustibles en la generación de energía, en estos procesos se tiene que la *eficiencia térmica bruta* está dada por la expresión:

$$E_v = \eta Q_i \quad (13)$$

Donde “ $\eta$ ” es la *eficiencia térmica total* del proceso de generación.  $E_v$ , es la energía producida útil a nuestras necesidades y  $Q_i$  es la energía suministrada al proceso. El indicador de *eficiencia ecológica* ( $\varepsilon$ ) debe tener forma similar a la eficiencia térmica de la planta, teniendo valores entre cero y uno, ser grande cuando “ $\eta$ ” es grande y es pequeña cuando  $\eta$  es pequeña o las emisiones de gases emitidas a la atmósfera expresadas por  $[(CO_2)_e]$  son grandes. Por lo que la *eficiencia ecológica* de la energía puede ser expresada en la siguiente forma:

$$\varepsilon = E_v / [E_v + \text{Energía pérdida por emisiones}] = E_v / [E_v + \kappa (CO_2)_e] \quad (14)$$

Estudiando el comportamiento de  $\varepsilon$  como función de una constante ( $\kappa$ ) relativa a “ $\eta$ ” se encuentra que el mejor valor para  $\kappa$  es 2, el cual es obtenido empíricamente y con este valor  $\varepsilon$  varía entre los límites de la unidad y cero, introduciendo la eficiencia a la ecuación, queda:

$$\varepsilon = E_v / [E_v + 2(CO_2)_e] = \eta Q_i / [\eta Q_i + 2(CO_2)_e] = 1 / [1 + 2 \Pi_g / \eta] \quad (15)$$

La cual depende de la “*eficiencia térmica bruta del proceso*” ( $\eta$ ) y el “*indicador de polución*” ( $\Pi_g$ ) que se utiliza para cuantificar el impacto ambiental de un combustible y está determinado por la relación entre “bióxido de carbono equivalente” y el poder calorífico inferior del combustible que genera los gases contaminantes.

$$\Pi_g \text{ [kg/MJ]} = \frac{(CO_e)_e}{Q_i} \quad (16)$$

<sup>27</sup> Cárdu M, Baica M. Regarding a global methodology to estimate the energy-ecologic efficiency of thermopower plants. *Energy Conversion & Management* 1999; 40(1); 71-78

<sup>28</sup> Bazán V, Cifuentes A. Determinación de la eficiencia ecológica en la generación de electricidad con fuentes fósiles en México en MAS XXI 2003. Proceedings, Universidad Autónoma de Sta Clara, Cuba, 2003

Silva E, Ribeiro S, Neves F., “Comparative analysis of environmental impacts of thermal power technologies in the Brazilian energy sector”. In ECOS 2003 Proceedings, Universidad Federal de Itajubá, Brazil, 2003

Los valores que se presentan en la tabla (2.10) fueron determinados considerando un coeficiente de *bióxido carbono equivalente*  $[(CO_2)_e]$  para el bióxido de azufre ( $SO_2$ ) de 700 (caso límite), es decir, suponiendo una situación extrema donde la máxima concentración aceptada para el bióxido de azufre es muy pequeña, por lo que se tiene un alto valor de *bióxido de carbono equivalente*<sup>29</sup>, y se expresa como:

$$(CO_2)_e = 700(SO_2) = 1400 \text{ (s)} ; \text{ en el caso límite} \quad (17)$$

Tomando en consideración a los contaminantes como parámetro en la eficiencia, se compararán dos combustibles virtuales como casos límite, donde el azufre será el "peor combustible posible bajo una normatividad extremadamente rígida", mientras el hidrógeno será el mejor combustible real:

### 2.10: Características de Algunos Combustibles (Incluyendo S & H<sub>2</sub>).

Combustible	S [%]	$(CO_2)_e$ [Kg/Kgf]	$Q_i$ [MJ/Kgf]	$\Pi_g$ [Kg CO <sub>2</sub> /MJ]
Azufre	100	1400	10.45	134
Lignito (Rivinari)	0.7	12.993	6.352	2.045
Carbón Bituminoso (Deva)	1.775	30.47	15.195	2.00
Carbón Bituminoso (Australia)	2.22	39.41	23.676	1.664
Carbón Bituminoso (Doicesti)	0.6	12.911	10.586	1.219
Combustóleo de alto contenido de azufre	3.1	56.51	41.773	1.353
Combustóleo de 2% de azufre máximo	2.0	38.63	43.104	0.896
Combustóleo Parafinado	1.02	24.91	42.892	0.581
Gas Natural	-	5.51	35.727	0.154
Hidrógeno	-	0	120	0

Fuente: Energy Conversion and Management 40 (1999) p. 1570

Podemos encontrar otra función que incluya los casos extremos como elementos normalizados para los límites de eficiencia entre cero y uno, (para los combustibles azufre e hidrógeno respectivamente), y tiene la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \varepsilon(\Pi_g, \eta) = [\kappa \cdot \varphi(\eta) \cdot \psi(\Pi_g)]^\nu \quad (18)$$

Donde  $\varepsilon$  varía entre los mismos límites de la *eficiencia térmica global* ( $\eta$ ).

El valor de  $\varepsilon = 0$  indica una situación insatisfactoria desde el punto de vista ecológico, mientras el valor  $\varepsilon = 1$  indica una situación ideal desde este punto de vista.

Así la ecuación (18) tiene que cumplir las siguientes condiciones:

1. Para  $\Pi_g = 0$  (combustión de hidrógeno),  $\varepsilon = 1$  para todos los valores de  $\eta$ .
2. Condición inicial  $\varepsilon = \varepsilon(\Pi_g, \eta) = \varepsilon(2.045, 0.3 - 0.4) = 0.3 - 0.4$  (Para un lignito).
3. Para  $\Pi_g = 134 \text{ Kg/MJ}$  (combustión del azufre);  $\varepsilon = 0$  para todos los valores de  $\eta$ .

<sup>29</sup> Energy Conversion & Management 40 (1999). Pp. 71-87 & Ibidem p.p 1569-1575

Conociendo que para un intervalo grande de los valores de  $\Pi g$ , entre  $\Pi g = 0$  (para el  $H_2$ ) y 134 Kg/MJ (para S), y que esto corresponde a un intervalo pequeño de variaciones de los valores de  $\varepsilon$ , que va desde  $\varepsilon = 0$  a 1, la subfunción  $\psi (\Pi g )$  de la ecuación (18) debe tener la forma logarítmica siguiente:

$$\psi (\Pi g) = \ln (\kappa_1 \pm \Pi g) \quad (19)$$

Donde  $k$  es una constante, así la condición 2, arriba mostrada,  $\Pi g = 134$  Kg/MJ para  $\varepsilon = 0$ , nos indica que  $\kappa_1$  debe tener un valor mayor en una unidad para normalizar el logaritmo, así  $\kappa_1 = 135$ ; y por lo tanto:

$$\psi (\Pi g) = \ln (135 - \Pi g) \quad (20)$$

Al mismo tiempo, la subfunción  $\varphi (\eta)$  de la ecuación (18) debe de dar la función  $\varepsilon$  como una propiedad que cuando  $\eta$  incremente, haga que la función  $\varphi (\eta)$  también lo haga.

Por lo tanto, considerando la condición 1, es consecuente notar que  $\varphi$  debe ser una función de  $\eta$  y  $\Pi g$  [ $\varphi = \varphi (\eta, \Pi g)$ ], de forma que para satisfacer estas condiciones esta función debe tener la forma:

$$\varphi (\eta, \Pi g) = \kappa_2 \frac{\eta}{\eta + \Pi g} \quad (21)$$

Sustituyendo, en la función (18) las subfunciones (19) y (16) se obtiene la ecuación:

$$\varepsilon = \left[ \left( \kappa_2 \frac{\eta}{\eta + \Pi g} \right) \times \ln (135 - \Pi g) \right]^n \quad (22)$$

Para obtener el valor de  $\kappa_2$ , se sustituyen los valores de  $\varepsilon$  y  $\Pi g$  de la condición 1, donde se obtiene  $\kappa_2 = 0.2038$ , así mismo se sustituyen los valores de la condición 2 para obtener el valor de "n" alrededor de  $n = 0.5$ , teniendo la *eficiencia ecológica de emisiones gaseosas* definida por la siguiente ecuación<sup>4</sup>:

$$\varepsilon_{\text{eco gas}} = \sqrt{\left( \frac{0.204\eta}{\eta + \Pi g} \right) \ln(135 - \Pi g)} \quad (23)$$

En esta ecuación se consideran las relaciones que guardan las emisiones gaseosas que ocasionan daños al medio ambiente y a las personas, por unidad de energía útil generada en la transformación de energía primaria de un combustible dentro del proceso de producción de energía térmica o eléctrica. Cabe señalar que en el caso de la evaluación de esta eficiencia es requisito que el factor  $\Pi g$  sea menor de 135 Kg/MJ puesto que la ecuación está definida pensando en la combustión del azufre ( $\Pi g = 134$  Kg/MJ) como máximo nivel extremo de  $\Pi g$  y la combustión del hidrógeno ( $\Pi g = 0$  Kg/MJ) como el mínimo valor posible. Así para cualquier combustible, excepto el hidrógeno todas las curvas de *eficiencia ecológica* contra *eficiencia térmica* comienzan de cero.



## 2.13 Marco Regulatorio Ambiental Nacional

Artículos ambientales de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos:

Artículo 4. Toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar.

Artículo 25. Bajo criterios de equidad social y productividad se apoyará e impulsará a las empresas de los sectores social y privado de la economía, sujetándolos a las modalidades que dicte el interés público y al uso, en beneficio general, de los recursos productivos, cuidando su conservación y el medio ambiente.

Artículo 73. Fracción XXIX-G. Para expedir leyes que establezcan la concurrencia del Gobierno Federal, de los gobiernos de los Estados y de los Municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico.

Tabla 2.11: Normas Mexicanas Vigentes (NMX) para Contaminación de la Atmósfera<sup>30</sup>

Clave	Regulación
NMX-AA-002	Evaluación de las emisiones de humo provenientes de motores estacionarios que usan combustible diesel
NMX-AA-009	Contaminación atmosférica-fuentes fijas-determinación de flujo de gases en un conducto por medio de Tubo de Pitot
NMX-AA-010	Contaminación atmosférica por fuentes fijas. Determinación de la emisión de partículas contenidas en los gases que fluyen por un conducto.
NMX-AA-011	Método de prueba para la evaluación de emisiones de gases del escape de vehículos automotores nuevos que usan gasolina como combustible
NMX-AA-023	Protección al ambiente-contaminación atmosférica-terminología
NMX-AA-035	Determinación de CO <sub>2</sub> , CO y O <sub>2</sub> en los gases de combustión
NMX-AA-049	Purificadores de aire electroestáticos
NMX-AA-054	Contaminación atmosférica, determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto.- método gravimétrico
NMX-AA-055	Fuentes fijas: Determinación de SO <sub>2</sub> en gases que fluyen por un conducto
NMX-AA-056	Contaminación atmosférica-fuentes fijas, determinación de bióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico en gases que fluyen por un conducto
NMX-AA-069	Contaminación atmosférica.- fuentes fijas.- determinación de ácido sulfhídrico en gases que fluyen por un conducto
NMX-AA-085	Contaminación atmosférica con fuentes fijas, gasómetros húmedos, método de sifoneo
NMX-AA-086	Contaminación atmosférica por fuentes fijas y calibración de rotámetros
NMX-AA-088	Contaminación atmosférica por fuentes fijas, gasómetros secos, calibración
NMX-AA-106	Determinación del diámetro máximo de poro en filtros rígidos y de membrana en función de la presión
NMX-AA-114	Contaminación atmosférica con fuentes fijas determinación de la densidad del humo en los gases de combustión que fluyen por un conducto o chimenea : "Método del número de mancha"

<sup>30</sup> NMX, son normas técnicas optativas (recomendaciones) que se pueden aplicar o no, por lo general se utilizan las técnicas de muestreo y análisis que presentan, tienden a convertirse con el tiempo y con mejoras en normas oficiales.

## Normas Oficiales Mexicanas (NOM<sup>31</sup>) de Contaminación Atmosférica:

Tabla 2.12: **NOM de Medición de Concentraciones (ECOL)**

Clave de la Norma	Medición que regula
NOM-034-ECOL-93	Monóxido de carbono
NOM-035-ECOL-93	Partículas suspendidas totales
NOM-036-ECOL-93	Ozono
NOM-037-ECOL-93	Bióxido de nitrógeno
NOM-038-ECOL-93	Bióxido de azufre

Tabla 2.13: **NOM Vigentes para la Contaminación Atmosférica (Industria)**

Clave de la Norma	Regulación
NOM-039-ECOL-1993	Plantas productoras de ácido sulfúrico. (bióxido y trióxido de azufre)
NOM-040-ECOL-1993	Fabricación de cemento. (emisiones fugitivas)
NOM-043-ECOL-1993	Partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.
NOM-046-ECOL-1993	Procesos de producción de ácido dodecibencensulfónico en fuentes fijas.
NOM-051-ECOL-1993	Gasoleo industrial que se consume por fuentes fijas en la ZMCM.
NOM-075-ECOL-1995	Compuestos orgánicos volátiles provenientes del proceso de separadores agua-aceite de las refinerías de petróleo.
NOM-085-ECOL-1994	Combustibles para equipo de calentamiento indirecto y directo por combustión.
NOM-086-ECOL-1994	Contaminación atmosférica especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles.
NOM-092-ECOL-1995	Instalación de sistemas de recuperación de vapores de gasolina en estaciones de servicio y de autoconsumo en el Valle de México.
NOM-093-ECOL-1995	Sistemas de recuperación de vapores de gasolina en estaciones de servicio y autoconsumo. (Método de prueba)
NOM-097-ECOL-1995	Material particulado y óxidos de nitrógeno en los procesos de fabricación de vidrio en el país.
NOM-105-ECOL-1996	Que establece los niveles máximos permisibles de emisiones a la atmósfera de partículas sólidas totales y compuestos de azufre reducido total provenientes de los procesos de recuperación de químicos de las plantas de fabricación de celulosa.
NOM-121-ECOL-1997	Que establece los límites máximos permisibles de emisión a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles (COV's) provenientes de las operaciones de recubrimiento de carrocerías nuevas en planta de automóviles, unidades de uso múltiple, de pasajeros y utilitarios; carga y camiones ligeros, así como el método para calcular sus emisiones.
NOM-123-ECOL-1998	Que establece el contenido máximo permisible de compuestos orgánicos volátiles (COVs), en la fabricación de pinturas de secado al aire base disolvente para uso doméstico y los procedimientos para la determinación del contenido de los mismos en pinturas y recubrimientos.

<sup>31</sup> Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son lineamientos que toda empresa y organismos deben cumplir pues son obligatorias.

**Tabla 2.14: NOM para la Contaminación Atmosférica (Calidad de combustibles)**

Clave de la Norma	Regulación
NOM-086-ECOL-1994	Combustibles líquidos y fósiles para fuentes fijas y móviles.

Fuente: <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/normas/index.html>

**Tabla 2.15: Normas Oficiales de la Secretaria de Salud (SSA) para calidad del Aire**

Clave de la Norma	Regulación
NOM-020-SSA-1993	Modificación Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al ozono (O <sub>3</sub> ). Valores normados para la concentración de ozono (O <sub>3</sub> ) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población, para quedar como Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de ozono (O <sub>3</sub> ) de la calidad del aire ambiente. Criterio para evaluar la calidad del aire.
NOM-021-SSA-1993	Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
NOM-022-SSA-1993	Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
NOM-023-SSA-1993	Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
NOM-024-SSA-1993	Norma Oficial Mexicana NOM-024-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a partículas suspendidas totales (PST). Valor permisible para la concentración de partículas suspendidas totales (PST) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
NOM-025-SSA-1993	Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a partículas menores de 10 micras (PM 10). Valor permisible para la concentración de partículas menores de 10 micras (PM10) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
NOM-026-SSA-1993	Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.

## 2.14 Bibliografía:

1. Chang. R. "Química". 4 ed., Mc Graw Hill., México, 1992. 1167 p.
2. IPCC (1996a). *Climate change 1995. "The science of climate change, summary for policymakers and technical summary of the working group I report"*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996. 56 p.
3. International Energy Agency. "Mexico Energy Outlook". OCDE/AIE. 2002
4. Marechal L. "Reflexiones sobre el concepto de desarrollo sustentable".  
<http://www.cgfforo.org.ar/Boletin/ITML.htm>
5. OLADE/CEPAL/GTZ. "Energía y Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe: Enfoques para la política energética". Quito, Mayo de 1997. 125 p.
6. Radian Corporation. "Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México", Volumen III - Técnicas Básicas de Estimación de Emisiones. USA. 1996. 133 p.
7. UN Department of Economic and Social Affairs: Division for Sustainable Development Indicators of sustainable development: Guidelines and methodologies 2001. <http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/isd.htm>
8. United Nations Environment Programme. "GEO-2000: UNEP's Millennium Report on the Environment". Earthscan Publications. 1999.
9. United Nations. "Agenda 21: Programme of Action for Sustainable Development, United Nations Conference on Environment and Development". Rio de J. Brazil. 1992
11. UNEP Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2001: Working Group 1: "The Scientific basis. 6.12 Global Warming Potentials".  
[http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/247.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/247.htm)
12. World Energy Council. *Living in One World. Sustainability from an Energy Perspective*. WEC. 2001. 192 p. <http://www.worldenergy.org>

## Capítulo 3. Tecnologías y Combustibles para la Generación de Energía Eléctrica

### 3.1 Introducción:

En el capítulo anterior se desarrolló el marco conceptual para evaluar el aprovechamiento de los recursos energéticos mediante distintos indicadores útiles dentro del marco de desarrollo sustentable e impacto ambiental. En este capítulo se abordan generalidades sobre los combustibles utilizados para la generación de energía eléctrica en México, dando énfasis a la disponibilidad de los recursos y sus aplicaciones, estudiando algunas tecnologías y sus implicaciones ambientales.

### 3.2 Los Combustibles Fósiles

Los combustibles fósiles son la principal fuente de energía a nivel mundial, su origen proviene de los organismos del reino vegetal que se vieron sometidos a procesos geológicos de acción bacterial, sepultamiento, compactación y calentamiento geotérmico. Las condiciones de presión a las que los restos de animales y plantas se vieron expuestos produjo una reducción total de los compuestos orgánicos que forman las variedades de carbón hasta su estado mineral y parcial en el caso de los hidrocarburos<sup>32</sup>.

El carbón, el petróleo y el gas natural se denominan en conjunto combustibles fósiles por ser el resultado de la descomposición de plantas y animales a lo largo de cientos de millones de años. El petróleo y el gas natural son combustibles más limpios y más eficientes que el carbón, sin embargo, las reservas de petróleo y gas a nivel mundial se están agotando a velocidades alarmantes, por ello, se han empezado a realizar investigaciones que buscan posicionar al carbón como una fuente de energía más versátil y limpia. Por otro lado, se plantea el fin de la era del petróleo puesto que se han hecho fuertes inversiones en la investigación de celdas de combustión para un uso intensivo del hidrógeno como fuente de energía sustituta.

En México el potencial de combustibles fósiles es diverso puesto que se cuenta con amplios yacimientos de petróleo, gas y carbón. Los volúmenes de las reservas probadas de gas seco<sup>33</sup> y petróleo medidos a condiciones atmosféricas y que pueden ser explotables con los métodos y sistemas actuales, son los siguientes:

Tabla 3.1: Reservas Probadas de Gas Seco y Petróleo en México 1998-2003

Energético	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Gas Seco (MMMpc)	30,064	30,394	41,382	28,151	14,985	20,740
Petróleo crudo (MMb)	24,700	24,631	23,660	22,419	15,124	14,119

Fuentes: PEMEX, Statistical Yearbook, 1998-2003, BP Statistical Review for World Energy, 2003

En la tabla anterior resalta el valor de las reservas en 2003, donde a diferencia de años previos PEMEX, valoró sus reservas bajo la definición de la *Securities and Exchange Commission* (SEC) de los Estados Unidos, haciendo más notoria la fuerte disminución en los volúmenes de las reservas probadas de gas y petróleo.

<sup>32</sup> Tissot B.O, Welte D.H., El petróleo su formación y localización, Ciencia y desarrollo. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. 1982. p.p 237.

<sup>33</sup> Gas natural que contiene cantidades menores de hidrocarburos más pesados que el metano.

### 3.2.1 Carbón

El carbón constituye casi 90% de las reservas mundiales de combustibles fósiles. En México, las reservas de carbón térmico sumaron 663 millones de toneladas hasta 1995. En la siguiente tabla se hace un recuento de los principales yacimientos de carbón en México de carbón térmico y coquizable, donde éste último empieza a usarse desde hace varios años para la generación de electricidad en el norte del país.

Tabla 3.2: **Reservas Probadas de Carbón Térmico en México (1995).**

Entidad Federativa	Cuenca carbonífera	MM Ton	Tipo
Coahuila	Villa Fuentes – Río Escondido	535	Térmico
Nuevo León	Colombia	92	Térmico
Oaxaca	La Mixteca	31	Térmico
Sonora	Barranca	5	Térmico
Coahuila	Sabinas, Esperanzas, y otras	1,566	Coquizable
Total		2,229	Total

Fuente: CFE, El Carbón en la Generación de Energía Eléctrica en México, 1992. pp. B-15 y B-17

En la actualidad los usos del carbón consisten en la coquización para su uso siderúrgico-metalúrgico, la combustión en plantas termoeléctricas y ferrocarriles, la calefacción comercial y residencial, la gasificación (producción de gas natural sintético) y la licuefacción (obtención de gasolina sintética).

Los tipos de carbón más representativos son el térmico (no coquizable) y el siderúrgico (coquizable). El carbón térmico generalmente se usa como combustible para la generación de calor y energía eléctrica. El carbón siderúrgico (que por su aglomeración se convierte en coque), se destina a la industria siderúrgica-metalúrgica y fundiciones.

La caracterización del carbón se hace en función del carbono fijo presente en la muestra (carbono presente seco y libre de material mineral), la materia volátil (óxidos gaseosos generados durante su combustión en base seca libre de material mineral), la humedad, cenizas, azufre y el Poder Calorífico Superior (PCS) del combustible sólido:

Tabla 3.3: **Clasificación de Carbones por Rango**

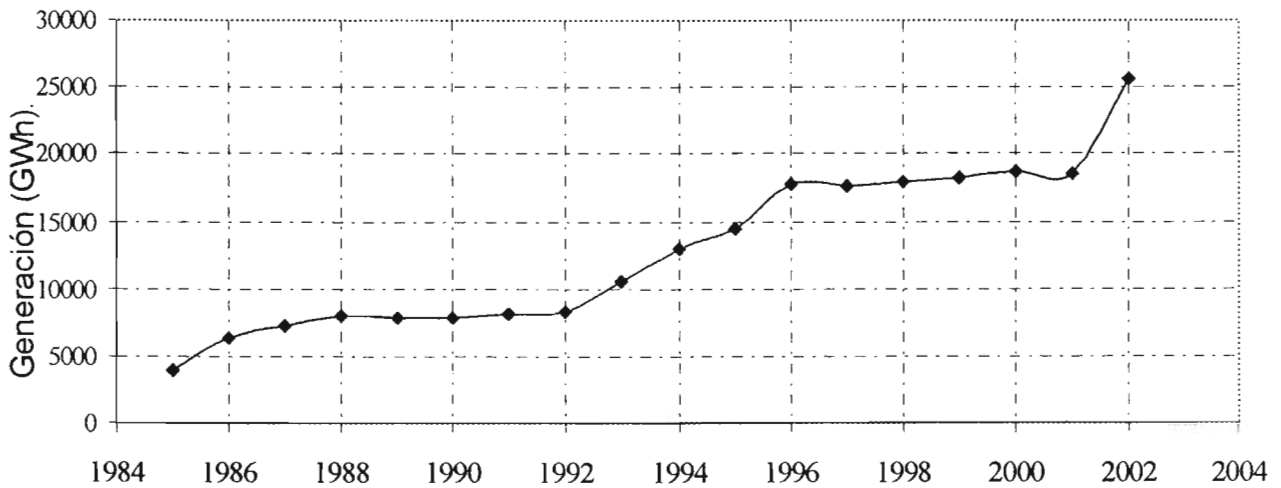
Clase	M. Volátil (%)	Grupo	Carbono fijo (%)	PCS (MJ/Ton)
Grafito	-	-	100	-
Antracita	0-14	Meta-antracita	98-100	-
		Antracita	92-98	>32,500
		Semiantracita	86-92	-
Bituminoso	14-31	Bajo volátil	78-86	-
		Medio volátil	69-78	26,700-32,500
		Alto volátil	<69	-
Sub bituminoso	31-40	Sub bituminoso A	-	24,400-26,700
		Sub bituminoso B	60-69	22,100-24,400
		Sub bituminoso C	-	19,300-22,100
Lignito	40-50	Lignito A	-60	14,600-19,300
		Lignito B	50-	<14,600
Turba	< 40		< 50	-

Fuente: Bazán V & Cano T., Balance Nacional de Energía, Sener. 2003

En México se cuenta con dos plantas carboeléctricas (Río Escondido y Carbón II) con una capacidad instalada de 2600 MW totales. También se ha construido en Petacalco, Guerrero, la central dual Presidente Plutarco Elías Calles que opera indistintamente con combustóleo o con carbón, pero que actualmente opera con carbón.

La participación del carbón nacional en la generación de la energía eléctrica en el país ha presentado un comportamiento creciente, de continuar esta tendencia, se vislumbra que este combustible será uno de los recursos energéticos de gran relevancia para el país en un futuro no muy lejano. Se espera que la demanda de este combustible en los próximos años siga aumentando con un crecimiento promedio anual de 1.3% hacia el 2030.

**Gráfica 3.1: Generación de Energía Eléctrica por Plantas Carboeléctricas**



Fuente: Bazán V & Cano T., Balance Nacional de Energía, Sener. 2003 p.133

### 3.2.2 Diesel

El Diesel es un combustible líquido que se obtiene de la destilación del petróleo entre los 2000 y 380°C. Su uso es automotriz, industrial y para la generación de energía principalmente en motores de combustión interna tipo diesel.

Las características más importantes del diesel son la viscosidad, volatilidad y calidad de ignición; ésta última se expresa en términos del número de cetano, que es muy similar al número de octano y expresa el % en volumen de cetano (C<sub>16</sub>H<sub>34</sub> de alta calidad de ignición). Según el tipo se usa para autobuses, camiones y generación eléctrica con turbinas de gas y máquinas diesel.

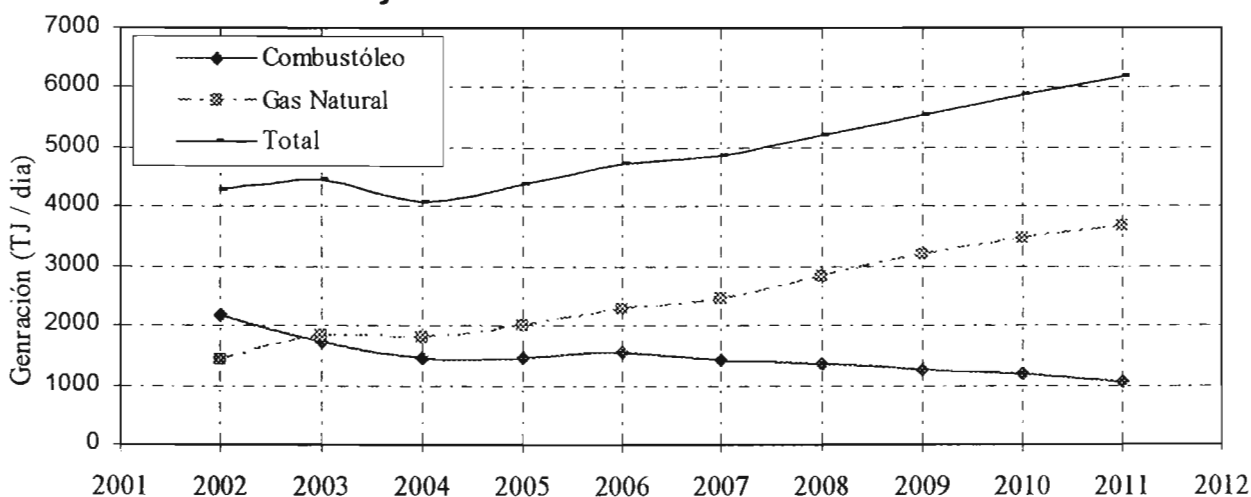
Los principales problemas de contaminación generados por el uso del diesel son la producción de partículas, humos negros y emisiones de azufre.

### 3.2.3 Combustóleo

El combustóleo es un combustible residual proveniente de la refinación del petróleo. Abarca todos los productos pesados; se utiliza principalmente en calderas, plantas de generación eléctrica y motores, se divide en: combustóleo pesado, ligero e intermedio.

El combustóleo como petrolífero tiene gran importancia por su consumo en plantas termoeléctricas, sin embargo, el endurecimiento de las normas ambientales, los precios con respecto al gas natural y la reducción en la producción del Sistema Nacional de Refinerías (SNR) de este petrolífero, han cedido paso a la sustitución de este combustible por gas natural, ya que la conversión del uso de combustóleo a gas natural en centrales de cogeneración con ciclo combinado aumentaría la demanda de gas dejando de lado al combustóleo. Las perspectivas de generación con fuentes fósiles apuntan que el gas natural sustituirá gradualmente al combustóleo como principal fuente combustible para la generación de energía eléctrica en México.

Gráfica 3.2: Combustóleo y Gas en la Generación de Electricidad en México



Fuente: Prospectiva del Sector Eléctrico, Sener. 2001

El combustóleo, debido a su bajo costo, se utiliza ampliamente como fuente de energía en calderas de diversas industrias, refinerías y centrales eléctricas. Sin embargo, se obtiene como residuo de petróleo que pasa por diversos procesos de refinación cada vez más severos que provoca que su calidad haya disminuido paulatinamente a través del tiempo. Esto, aunado a que la mayoría de los equipos en donde se utiliza se diseñaron para usar uno de mejor calidad, ha traído como consecuencia que se hayan incrementado las anomalías en estos equipos. Dentro de los problemas que se encuentran por la combustión de combustóleo nacional se pueden mencionar: ensuciamiento anormal de las superficies de intercambio de calor, disminución de *eficiencia térmica* y de combustión e incremento de emisiones. Este último, se relaciona con el contenido de asfáltenos en el combustóleo. Esto es, que a mayor contenido de asfáltenos y cenizas, mayor emisión de partículas no quemadas<sup>34</sup>.

<sup>34</sup> Molero de Blas L. J " Pollutant formation and interaction in the combustion of heavy liquid fuels". PhD Thesis. University College London. Lon. England



### 3.2.4 Gas Natural

El gas natural es una mezcla gaseosa de hidrocarburos de origen fósil procedente de la descomposición de la materia orgánica atrapada en yacimientos subterráneos tanto terrestres como marinos, en forma de bolsas, asociados a yacimientos de petróleo crudo (gas asociado), pero también puede encontrarse solo (gas no asociado).

De los combustibles fósiles el gas natural es *el más limpio* debido a su composición química, adicionalmente se han utilizado para su aplicación a nuevas tecnologías y equipos con elevados rendimientos. Su combustión al igual que el resto de los combustibles fósiles produce CO<sub>2</sub> y vapor de agua. En el caso del gas natural se tienen menos emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de energía producida con respecto al petróleo (30% menor) y al carbón (50%) durante la combustión del gas natural.

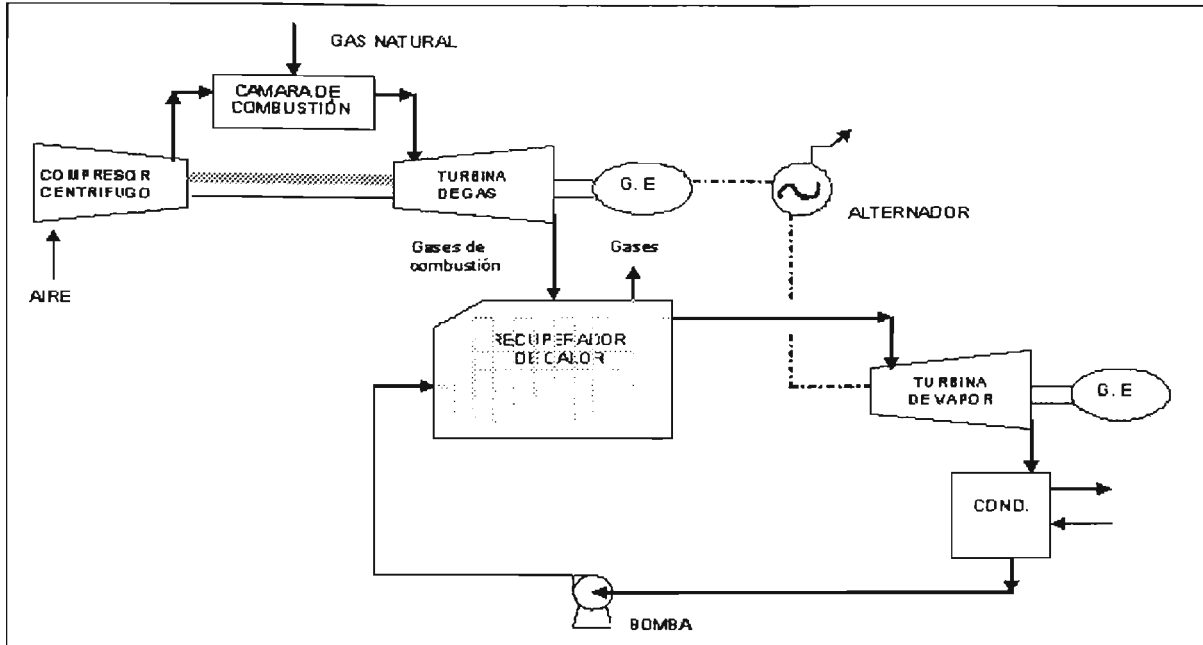
El gas natural también se ha posicionado como el combustible fósil más eficiente en la generación de energía eléctrica teniendo en cuenta las altas eficiencias de los procesos de combustión de gas natural, la facilidad de su mezclado con el aire por su estado gaseoso, las avanzadas tecnologías de recuperación de calor en los mismos, las proporciones de contaminantes finalmente emitidos son menores con respecto a otros combustibles. Las plantas de potencia con tecnología de turbinas de gas de ciclo combinado, son la principal tecnología moderna para la generación de electricidad a escala mundial, esto debido a su alta *eficiencia térmica* y su bajo costo de instalación.

Una planta de ciclo combinado implica la existencia de al menos una turbina de gas, una de vapor y un recuperador de calor (caldera). Donde básicamente se trata de producir electricidad a partir de un combustible. Los gases de combustión pasan a una turbina de gas acoplada a un generador. En la salida de la turbina los gases han perdido temperatura y presión, pero aun así, contienen suficiente energía para aprovecharla en la *caldera de recuperación de calor* donde se genera vapor en el intercambio de calor a contra corriente con los gases de combustión, este vapor es aprovechado en la turbina de vapor que a su vez está acoplada a un generador.

El ciclo combinado es la unión de un ciclo Bryton (turbina de gas) y un ciclo Rankine (turbina de vapor). El calor generado en el ciclo Bryton es la entrada para el ciclo de Rankine. Cuando parte del vapor generado, o el calor generado, en la caldera se aprovecha para un proceso industrial se puede hablar de una aplicación de cogeneración. En estos casos el aprovechamiento de energía está entre el 80-85%, comparado con el 50-55% del ciclo combinado.

En el diagrama siguiente se muestra la configuración del proceso de una planta de potencia para la generación de energía con turbinas de gas de ciclo combinado:

Figura 3.1: Planta de Potencia de Gas con Turbinas en Ciclo Combinado.



Fuente: Elaboración propia.

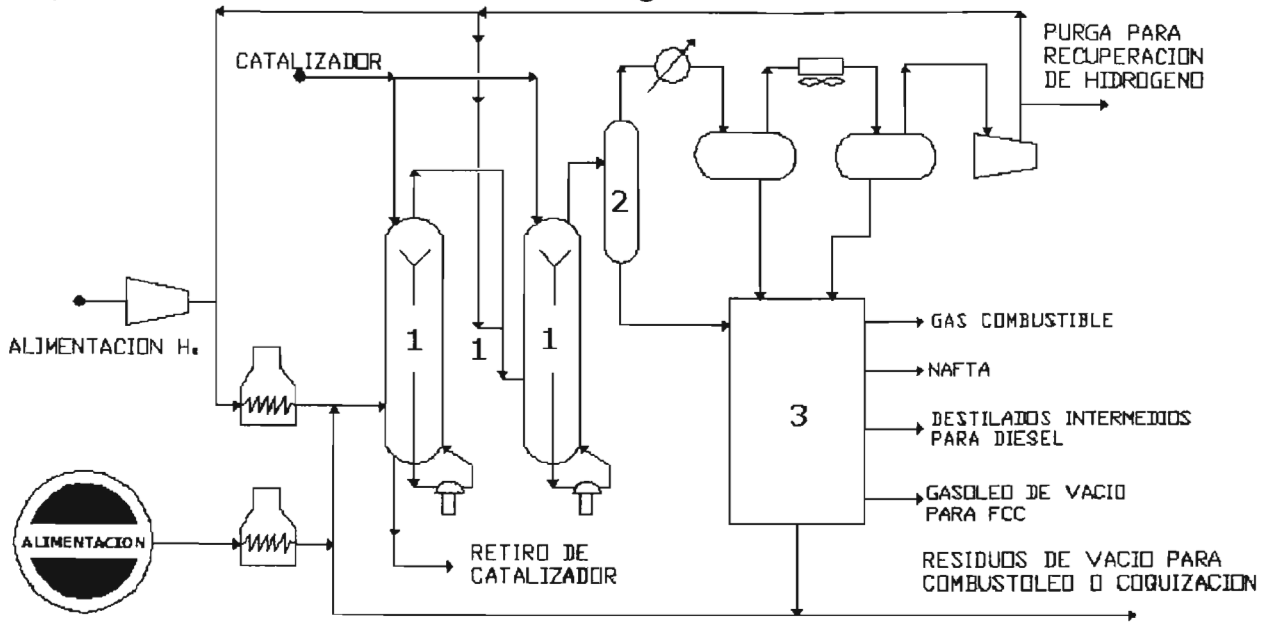
### 3.3 Limpieza de Elementos Contaminantes en Combustibles Fósiles

1. La industria de refinación dispone de tecnologías con aprovechamiento de fondos de barril para generar petrolíferos con niveles mínimos de azufre (0.45 a 1% w/w), nitrógeno y metales, estos procesos son denominados **hidrodesintegración catalítica** de aceites residuales y son alimentadas de asfaltos y residuos de vacío con contenidos altos de azufre, nitrógeno y metales.

Tecnologías comerciales como el proceso **H-Oil** y **LC-Fining** aprovechan los crudos pesados para generar petrolíferos como gasolinas, combustóleo y diesel, que alimentados a plantas termoeléctricas, producen cantidades mínimas de gases contaminantes (NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>) durante su combustión. El uso de estas tecnologías es una alternativa a la inversión en nuevas plantas que usan gas natural en función de su precio o con fines ecológicos.

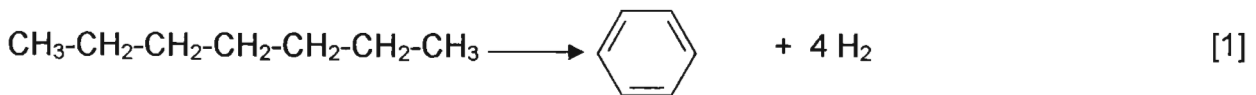
La hidrodesintegración catalítica o hidrotratamiento catalítico (HDT) es un proceso que se utiliza en el procesamiento de fracciones pesadas provenientes de la destilación del petróleo, en el cual se pone en contacto la carga con un catalizador y en presencia de hidrógeno en abundancia. Este proceso es utilizado para disminuir la concentración de contaminantes como: el azufre (S), nitrógeno (N) y metales (M). El proceso genera gasolinas, diesel y combustoleos con niveles mínimos de S, N y M. En un proceso de hidrodesintegración de aceites residuales (HDR) o en forma comercial (H-Oil) podemos tener presentes reacciones de hidrodesaromatización (HDA), hidrodesmetalización (HDM).

Figura 3.2 Proceso H-Oil de Hidrodesintegración de Aceites Residuales.



Fuente: McQuitty W. D

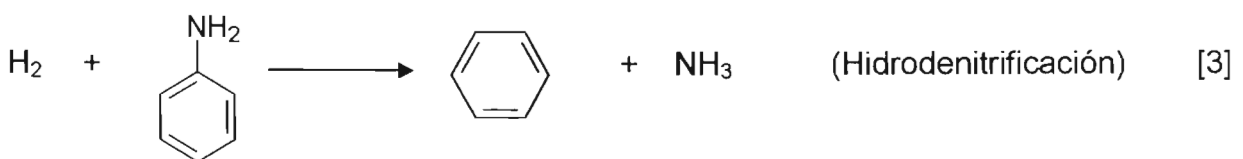
2. El *reformado catalítico* es otro proceso de la industria de refinación, este proceso se tiene en las plantas Hidrodesulfuradoras de Naftas (HDN), en donde el azufre es eliminado mediante una serie de reacciones que tienen el fin de aumentar el número de octanos en la gasolina (deshidrociclización), en el reformado catalítico la estructura de las moléculas se reordena para formar aromáticos de mayor octanaje, por lo que se liberan grandes cantidades de hidrógeno con el que se elimina el azufre presente.



(Dehidrociclización de parafinas a aromáticos)



(Hidrodesulfuración de un mercaptano)

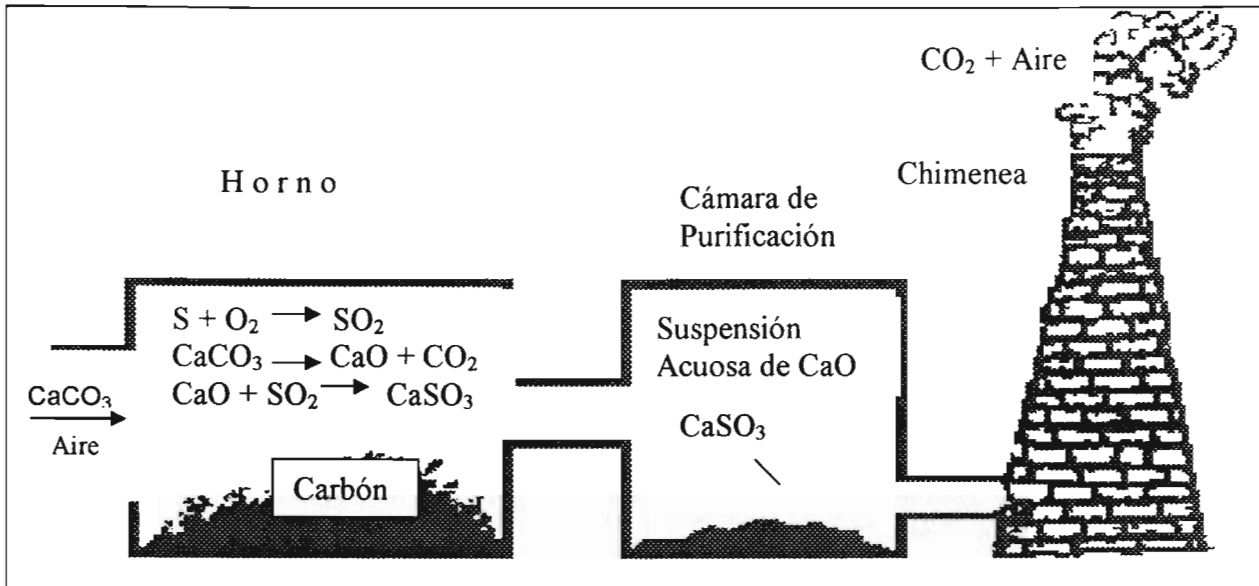


El ácido sulfhídrico y el amoníaco, que son productos de la hidrogenación reaccionan posteriormente para formar sulfuro de amonio [3]. La inyección de agua se usa en el proceso con el objeto de solubilizar ese agente y eliminar así el azufre y nitrógeno presentes en los hidrocarburos tratados.



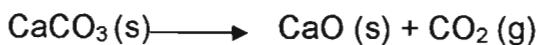
3. Otra estrategia (menos eficaz) para eliminar azufre es *eliminar el SO<sub>2</sub> a medida que se va produciendo*. En el proceso se va inyectando piedra caliza en polvo en el quemador o en el horno de la planta generadora de energía junto con el carbón mineral alimentado. A temperaturas elevadas ocurre la siguiente descomposición (figura 3.3):

Figura 3.3: Eliminación de SO<sub>2</sub> en el uso de Combustibles Fósiles.

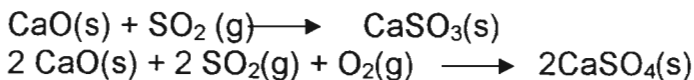


Fuente: Chang R. *Química*. 4a Edición. 1992. p.660

La piedra caliza pulverizada se descompone en óxido de calcio (CaO), que reacciona con el SO<sub>2</sub> para formar CaSO<sub>3</sub>. El SO<sub>2</sub> remanente entra entonces a una cámara en donde reacciona como una suspensión acuosa de CaO para formar CaSO<sub>3</sub>:



La piedra caliza reacciona con el SO<sub>2</sub> producido durante la combustión para formar el sulfito de calcio y algo de sulfato de calcio:



Para quitar cualquier porción de SO<sub>2</sub> que no haya reaccionado se inyecta una suspensión acuosa de piedra caliza en una cámara de purificación antes de dejar que los gases escapen por la chimenea.

4. Una forma de *transformar el azufre contaminante en materia prima útil* para otro proceso es instalando una planta de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) en las cercanías, donde la materia prima es el oxido de azufre (SO<sub>2</sub>) producido en el proceso de combustión.

### 3.4 Generalidades sobre la Combustión de Fuentes Fósiles

Toda quema de hidrocarburos tiene como consecuencia la producción de CO<sub>2</sub> y vapor de agua H<sub>2</sub>O, los volúmenes de emisión de estos productos dependerán de la relación hidrógeno y carbono existentes en el combustible:

Metano (Gas natural): CH<sub>4</sub> H/C = 4/1 = 4

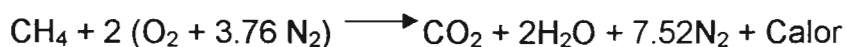
Decano (Petróleo<sup>35</sup>): C<sub>10</sub>H<sub>22</sub> H(2n+2)/Cn = 22/10 = 2.2

Coroneno (Carbón<sup>32</sup>): C<sub>12</sub>H<sub>24</sub> H/C = 12/24 = 0.5

Toda reacción de combustión requiere de tres elementos para realizarse: 1) combustible, 2) comburente (generalmente aire) y 3) energía. Para hacer posible una buena combustión no es suficiente agregar sólo el aire estequiométrico requerido (oxígeno necesario para realizar la combustión completa), se necesita considerar la adición de un exceso suficiente para que todas las moléculas del combustible sean oxidadas (quemadas) completamente y se evite de esta manera la producción de partículas contaminantes, produciendo humos y CO que además obligan a utilizar más combustible para obtener el calor requerido por el proceso, esto depende del combustible utilizado y del diseño del quemador.

Por tal motivo es muy importante operar los equipos de combustión a la menor temperatura posible y bajo la menor relación de aire en exceso, dependiendo principalmente del diseño de los equipos y de los ajustes periódicos que se le hagan al sistema.

En un proceso de combustión común se pueden tener varios escenarios. Por ejemplo, en el caso de la combustión completa del metano se tiene:



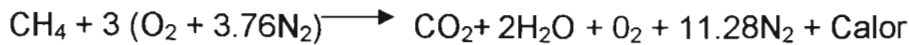
En la ecuación anterior se desprende una gran cantidad de calor por unidad de volumen de combustible y se generan grandes volúmenes de gases residuales que se tienen que desalojar. En términos de masa de gas, la estequiometría de la reacción muestra que se generan 2.75 Kg CO<sub>2</sub>/ Kg de CH<sub>4</sub> y 2.25 Kg H<sub>2</sub>O / Kg CH<sub>4</sub>.

Los gases que se arrojan, invariablemente están a una temperatura superior a la atmosférica y es correcto pensar que cuando la temperatura de estos gases se incrementa la energía que arrastran consigo es igualmente mayor en cantidad, disminuyendo la eficiencia final del sistema.

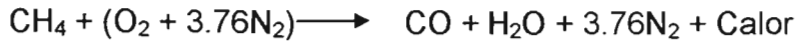
---

<sup>35</sup> El petróleo es una mezcla compleja de hidrocarburos, no tiene una composición exacta, ni proporciones definidas de compuestos, sin embargo tanto al carbón como al petróleo en este ejemplo se les asocia por aproximación al decano y coroneno, respectivamente.

Proceso de combustión del metano con exceso de aire:



Proceso de combustión incompleta del metano:



Por lo tanto, existen tres situaciones básicas que son necesarias de controlar para poder ahorrar costos por concepto de combustible en un proceso de combustión:

- ✓ Evitar el aire en exceso (solamente lo necesario para la combustión completa).
- ✓ Recuperar el calor que arrastran consigo gases producto de la combustión.
- ✓ Evitar la aparición de inquemados como el monóxido de carbono.

En términos generales, en la mayoría de las instalaciones consumidoras de combustible es rentable introducir los sistemas de combustión de tecnología avanzada que permitan:

1. Mantener las características de calentamiento constante y acorde a las variaciones de carga del equipo de calentamiento (hornos, calderas, quemadores, entre otros).
2. Mantener el funcionamiento de los equipos con las máximas garantías de seguridad.
3. Optimizar el consumo de combustible a través de un aumento de rendimiento.

En la mayoría de los sistemas de combustión de gas natural se puede lograr la combustión completa con tan solo el 10% de exceso de aire, pero frecuentemente los sistemas de combustión están ajustados a quemar el gas con 60% o más de exceso de aire lo que provoca una pérdida considerable en combustible y daña la economía de las empresas.

### 3.5 Combustión y Calidad del Aire

Las siguientes son algunas tecnologías con las que se puede mejorar la calidad de las emisiones:

#### 1) *Cambio de Combustible:*

El cambio de un combustible de sólido a líquido o gaseoso, o de un líquido a gaseoso. El desarrollo de combustibles nucleares que ocurrió en el siglo XX es un ejemplo de cambio de combustible relativamente reciente. La leña es un combustible sustituto del carbón, en la medida que existan recursos suficientes en los bosques sin tener que agotar el recurso.

## 2) *Limpieza de Combustibles:*

El lavado del carbón es un ejemplo de limpieza de combustibles, otro ejemplo es el no agregarle elementos no combustibles.

## 3) *Captura/ Remoción de Azufre:*

La remoción del azufre de los combustibles o la captura de las emisiones de bióxido de azufre y vapores de ácido sulfúrico son una forma de evitar la generación de uno de los contaminantes más dañinos que existen. La modificación masiva a las plantas carboeléctricas alrededor del mundo han eliminado emisiones de millones de toneladas de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) a la atmósfera usando tecnologías innovadoras para su captura o remoción.

## 4) *Reducción de Partículas:*

La Combustión completa o la utilización de precipitador electrostático u otros dispositivos son usuales en la separación de partículas, por ejemplo, una atomización mejor del combustible líquido reduce perceptiblemente la formación de partículas y puede evitar la producción de compuestos tóxicos, tales como, hidrocarburos aromáticos policíclicos, o la generación de carbón residual (CCR) descrito más adelante.

## 5) *Tecnología de Oxidación Catalítica:*

La tecnología de oxidación catalítica se utiliza principalmente en la eliminación del monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos generados por combustión, el ejemplo más extenso es el convertidor catalítico de tres vías usado en los automóviles nuevos.

## 6) *Tecnología de Reducción Catalítica:*

Los avances recientes en las tecnologías de reducción catalítica para fuentes inmóviles (una consecuencia del desarrollo del catalizador del automóvil) se están empleando como nuevos medios para la reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) en la industria, con el uso de la reacción del amoniaco-NO<sub>x</sub> sobre una cama del catalizador, hoy virtualmente toda nueva central eléctrica se construye con un cierto tipo de tecnología de reducción catalítica.

## 7) *Oxidación de Alta Temperatura:*

Este proceso se asemeja mucho a la oxidación catalítica, excepto que no se utiliza ningún catalizador. Las altas temperaturas de la combustión, exceso del oxígeno, y la turbulencia son una combinación eficaz para alcanzar la oxidación completa (es decir ruptura) de componentes sólidos, líquidos, y gaseosos. La turbina de gas es ideal para cumplir estas condiciones.

### 3.6 Hidrógeno

El hidrógeno como vector de energía se ha discutido por décadas, se le propone como sustituto de los hidrocarburos por ser un combustible limpio, sin emisiones de bióxido de carbono durante su combustión, pues sólo genera agua y calor.

El hidrógeno ( $H_2$ ) tiene *propiedades* singulares: es un gas incoloro e inodoro, con densidad de 0.0899 g/l (el aire es 13.6 veces más denso); como líquido tiene una densidad de 70.99 g/l. Hierve a  $-252.77^\circ\text{C}$  y tiene el más alto contenido energético de todos los combustibles (120 MJ/kg) tan sólo 1 kg de  $H_2$  contiene la misma cantidad de energía que 2 kg de gas natural, 3 Kg de petróleo maya y 6.3 Kg de carbón térmico nacional. Después del helio es el gas más difícil de licuar ( $-253^\circ\text{C}$ ). No existe en forma natural, sino combinado y se requiere producirlo o separarlo en procesos específicos, por ejemplo vía electrólisis del agua que contiene 11.2% de hidrógeno. El hidrógeno puede ser utilizado como combustible ya sea quemado o bien oxidándolo electroquímicamente.

Actualmente se producen 45 millones de toneladas de hidrógeno a nivel mundial, puede ser utilizado como transportador y generador de energía eficiente y limpia, sin embargo su costo de producción es relativamente alto (el principal obstáculo a vencer), por ello varios países investigan como disminuir los costos y optimizar la producción.

El  $H_2$  es producido principalmente mediante el proceso de reformación catalítica que abarca el 80% de la producción mundial de este gas. También se puede obtener vía electrólisis a baja presión de agua o por electrólisis cloro-alcalina, también se puede producir de la biomasa, y por disociación térmica del agua utilizando el calor producido durante el enfriamiento de los reactores nucleares.

Las tecnologías de producción de hidrógeno disponibles hoy en día satisfacen de forma suficiente las necesidades de la industria química y de refinación, sin embargo, se prevé que en un futuro muy próximo se necesitará de mayores cantidades, por lo que será necesaria una reducción en los costos de procesamiento y de mejores tecnológicas en los procesos de 1) producción, 2) transporte, 3) almacenamiento, 4) conversión y 5) su aplicación. La tecnología de procesos químicos, electroquímicos y la catálisis desempeñarán un papel crítico en la introducción del hidrógeno y la generación de energía en celdas de combustible.

El uso de hidrógeno en *celdas de combustible* (cc) para sistemas de propulsión a bajas temperaturas (Celdas de combustión de membrana) eliminan completamente cualquier contaminante. El único producto de la producción de electricidad con  $H_2$  es agua desmineralizada y calor, lo que implica cero emisiones gaseosas contaminantes con respecto a otros combustibles convencionales.



El hidrogeno puede ser almacenado por mucho tiempo hasta ser utilizado en celdas de combustible, a diferencia de los sistemas tradicionales de baterías (solar, eólica) y en forma sólida (hidruro metálico), que es un sistema muy práctico de almacenamiento de energía química. Puede ser usado como un *combustible limpio* (sin emisión de gases contaminantes), para aplicarse en el transporte en el corto plazo, principalmente en vehículos urbanos reduciendo las emisiones en ciudades, pudiendo así incidir en el largo plazo en barcos, trenes y aviones.

Ofrece la posibilidad (dependiendo del método de producción), para eliminar drásticamente las emisiones de gas carbónico (CO<sub>2</sub>). Actualmente, se estudian diversas cadenas de producción de hidrógeno orientadas al campo de las fuentes de energía renovable:

Solar

Viento

Bacterias

Mareas

Olas

Hidroeléctricas

Reformado de metanol

Debido al alto índice de contaminación en el planeta por la combustión de hidrocarburos, se plantea que ya se comienzan a percibir los primeros efectos del cambio climático asociados a la contaminación por combustibles fósiles. La conversión de hidrocarburos en combustibles sin azufre y nitrógeno por hidrogenación, empieza a figurar como un primer paso hacia una economía del hidrógeno. El uso intensivo de las tecnologías de combustión del hidrógeno en celdas de combustión o turbinas de gas tendrá como primer impacto una notable disminución en emisiones de gases contaminantes a nivel mundial.

Las primeras *aplicaciones* del hidrógeno se dan en el sector transporte (actualmente muy contaminante), por ello las grandes empresas automotrices invierten tiempo y recursos en la investigación para generar vehículos que terminen con más de 100 años de reinado de máquinas de combustión interna, sustituyéndolas por celdas de combustible. Un automóvil operando con celdas de combustible requerirá almacenar aproximadamente 5 Kg (70L) por cada 500Km (a presiones severas), sin embargo, actualmente el almacenamiento de hidrógeno se podrá hacer mediante hidruros metálicos. MBW y mercedes-Benz han sido compañías pioneras en investigaciones de vehículos de propulsión interna por H<sub>2</sub> (almacenando hidrógeno en hidruros metálicos).

### 3.7 Utilización del Hidrógeno en la Industria.

Industria Eléctrica: Se utiliza en las estaciones termoeléctricas de generación de energía como enfriador de turbinas o alternadores, aprovechando su gran conductividad térmica, disminuye el arrastre y fricción del aire evitando daños al equipo.

Industria Química. Se usa para la producción de una gran cantidad de productos químicos tales como al ácido tereftálico purificado (para fabricar Politétereftalato, PET), en la elaboración de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), fibras sintéticas como nylons intermedios o poliestirenos, poliéster, acetatos, saborizantes, aromatizantes y cosméticos, en la elaboración de polietileno y polipropileno.

Refinación: El hidrógeno será un elemento continuamente utilizado en los procesos de refinación, a medida que la calidad de los petrolíferos demandados sea más exigente en la normatividad relativa a la calidad de los combustibles, el hidrógeno está implicado en los siguientes procesos: Hidrodesintegración de residuales (HDR), reformado catalítico (CCR), procesos de gasificación (PG) y reformado de vapor-metano.

Industria Alimenticia. Producción de mantecas para panadería, margarinas, aceites vegetales, aceite de pescado, pasta de dientes, hidrogenación de resinas sintéticas como materia prima para la Industria Alimentaria o Refresquera.

Celdas de Combustible. Para la generación de electricidad con usos en vehículos automotores, autobuses, edificios, casas y habitación y la industria en general.

El hidrógeno estará implicado en la producción de algunos aceros de alta calidad, acero galvanizado, acero al silicio para componentes eléctricos, atmósferas especiales para hornos con hidrógeno de alta pureza, flamas de alta temperatura, globos meteorológicos, elaboración de chips de alto rendimiento para la electrónica. La electricidad y el hidrógeno serán eventualmente derivados de fuentes renovables de energía, los combustibles fósiles probablemente servirán como fuente de energía transitoria.

### 3.8 Producción de Hidrógeno por el Proceso de Reformado de Vapor

El *reformado de vapor-metano* es el proceso más utilizado hoy en día para la producción de hidrógeno de alta pureza. Las alimentaciones del proceso son: gas natural, GLP, gas de refinería y nafta.

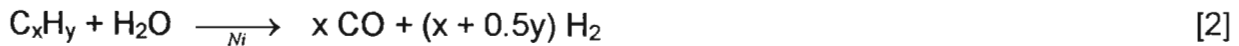
Descripción del proceso (figura 3). La alimentación de *hidrocarburos ligeros* es calentada (1) antes de pasar por dos arreglos de camas catalíticas. Los compuestos orgánicos con azufre presentes en el gas de alimentación (mercaptanos) son convertidos en ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ); y las mono-oleofinas en fase gaseosa son hidrogenadas en la primera cama del catalizador de óxido de cobalto-molibdeno (2). La segunda cama contiene  $\text{ZnO}$  para remover el  $\text{H}_2\text{S}$  por absorción. Esta etapa de remoción de azufre es necesaria para evitar envenenar el catalizador. El gas de alimentación es mezclado con vapor y calentado antes de pasar al *reformador* (reactor) donde los hidrocarburos y el vapor reaccionan para formar gas sintetizado (syngas).

Las principales reacción del proceso del reformado del vapor son:



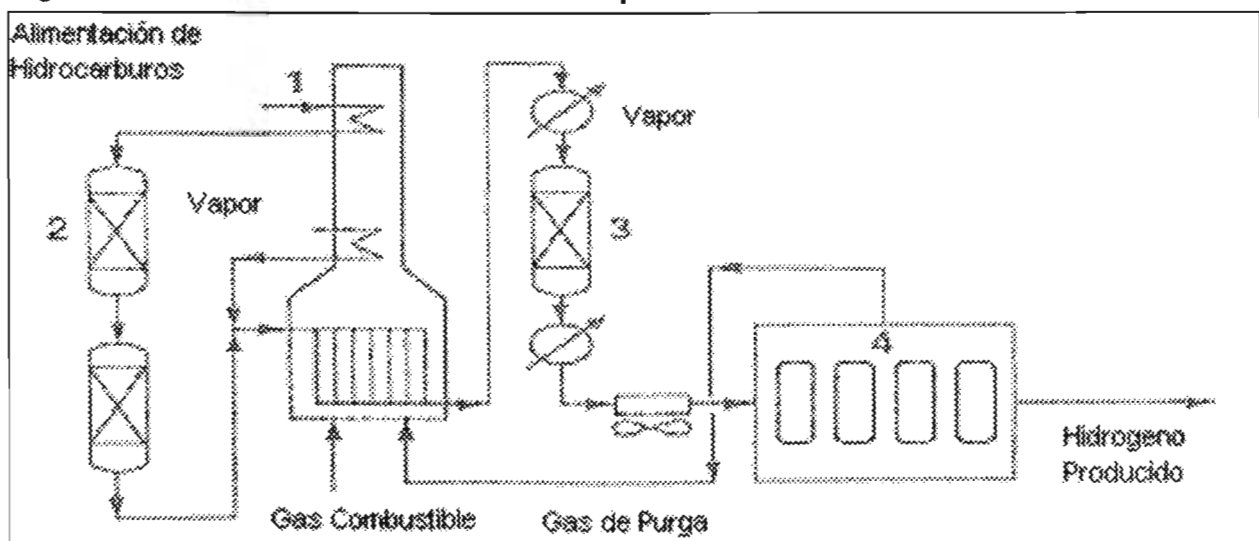
En la Figura 3.4 la reacción de reformado ocurre a lo largo de un catalizador de níquel empaquetado en tubos que son calentados a fuego directo (1). La reacción entre estas dos moléculas es altamente endotérmica [1] y requiere la presencia del catalizador y una temperatura alta para alcanzar una conversión grande. Un exceso de vapor es usado para promover la reacción de reformado y evitar depósitos de carbón en el catalizador.

El syngas que contiene hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y agua, sale del *reformador* y pasa a través de un recuperador de calor hacia [3] el reactor post-reformador (3) (adicional al *reformador* convencional), donde el total del CO es convertido a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> por reacción con vapor. Para alimentaciones de hidrocarburos más pesadas se puede utilizar un pre-reformador de la carga de alimentación.



Posteriormente, el *syngas* es enfriado por intercambiadores de calor para recuperar energía; la corriente resultante se pasa por una *unidad de absorción* (4), donde se elimina el CO<sub>2</sub>. Tres partes de CO<sub>2</sub> y CO son eliminadas haciendo reaccionar exotérmicamente estos compuestos con vapor para formar CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>O. La corriente a la salida del absorbedor tiene un 99.9% de calidad de H<sub>2</sub>. El gas de purga de esta unidad provee una parte substancial de la proporción del combustible para el calentamiento del reactor. El vapor saturado y sobrecalentado es generado por intercambio de calor con el gas reformado. El vapor generado puede variar entre 1,250-5,750lb / MMpcd de H<sub>2</sub> producido, en función de la capacidad de la planta.

Figura 3.4: **Proceso de Reformado de Vapor-Metano.**



Fuente: Hydrocarbon Processing. Nov 2002. p 123.

## Características del Proceso de Reformado de Vapor-Metano:

Se pueden construir este tipo de unidades con capacidades de producción de entre 10 a 100 MMpcd de hidrógeno.

Tabla 3.4: **Características del Proceso por cada MMpcd de H<sub>2</sub> Producido**

Corriente	Cantidad / MMpcd H <sub>2</sub>
Alimentación + combustible (lb)	960
Agua, desmineralizada (lb)	4,420
Vapor producido (lb)	3,320
Agua de enfriamiento (Gal)	1,180
Electricidad (KWh)	12
Eficiencia (%PCS)	83

Fuentes: Hydrocarbon Processing. Nov 2002. p 123. &  
U.S Department of Energy. Hydrogen from natural gas and coal

### 3.9 Biocombustibles

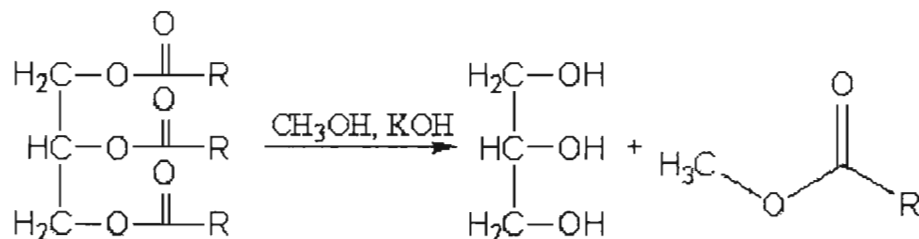
Los biocombustibles son obtenidos de la biomasa (materia orgánica de origen animal o vegetal) entre ellos se encuentran el alcohol etílico o etanol, metanol, diesel y el metano. Los biocombustibles se utilizan principalmente como fuente de energía para el transporte y la producción de energía eléctrica.

Los biocombustibles son buenos para el medio ambiente porque generan menores emisiones gaseosas a la atmósfera que los combustibles de petróleo y comúnmente se producen de desechos que ya no tienen uso. A diferencia del petróleo, que es un recurso natural no renovable, los biocombustibles son renovables, o bien son producidos con recursos renovables.

**3.9.1 Bioetanol:** El bioetanol es un alcohol que se produce a partir de los carbohidratos contenidos en vegetales, tales como el maíz o la papa, mediante un proceso de fermentación similar al de la cerveza, en donde, los almidones son convertidos en azúcares, los cuales se fermentan en etanol que es posteriormente destilado. El bioetanol se utiliza para mejorar el octanaje de las gasolinas y mejorar la calidad de sus emisiones, se pueden generar mezclas tales como la E10 (10% etanol y 90% gasolina), pero puede ser mezclado en otras proporciones tales como la E85 o en su forma pura.

**3.9.2 Biodiésel:** El biodiésel es un éster que se produce mediante el denominado proceso de transesterificación de aceites de semillas (soya, girasol y palma), de grasas de animales (manteca, grasa o cebo) y de aceites residuales vegetales o animales combinados con alcohol (etanol o metanol) en presencia de catalizadores alcalinos (NaOH, KOH o CH<sub>3</sub>OH), originando ésteres metílicos y etílicos (biodiesel) y glicerina. Estos ésteres se mezclan con el combustible diésel convencional en la proporción típica de B20 (20% biodiésel y 80% diésel) o bien puede ser usado como biodiésel puro (biodiésel 100%), el nivel de mezcla dependerá del costo de producción del combustible y las ganancias deseadas.

En una reacción de transesterificación los ésteres que forman parte de las grasas y aceites, llamados triglicéridos (ésteres de glicerina), reaccionan con metanol (CH<sub>3</sub>OH):



Obteniéndose ésteres metílicos (biodiésel) y glicerina. Se emplea hidróxido de sodio, potasio (NaOH, KOH), u otra base similar (CH<sub>3</sub>OH), como catalizador.

Triglicéridos (grasas) + Alcohol (Metanol) =sosa=> Biodiésel (metil-ésteres) + Glicerina

El biodiésel presenta algunas ventajas comparado con los combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural), especialmente desde el punto de vista ambiental y de desarrollo sostenible; la materia prima de la que se obtiene (biomasa) es un recurso renovable y en la combustión sólo se emite bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua, mientras que los combustibles fósiles emiten además contaminantes precursores de la lluvia ácida (principalmente óxidos de azufre), y residuos sólidos. Por otra parte, la glicerina que se obtiene como subproducto se puede emplear en otros procesos industriales.

El uso del biodiesel en un motor diesel convencional resulta en una reducción sustancial de los hidrocarburos no quemados, del monóxido de carbono y de la materia sólida. Las emisiones de óxidos de nitrógeno son ligeramente reducidas o aumentadas según el ciclo de actividad y los métodos de prueba. El uso de biodiesel disminuye la fracción de carbono sólido (ya que el oxígeno en el biodiesel permite una más completa combustión del CO<sub>2</sub>), elimina la fracción de sulfato (ya que no hay sulfuro presente en el combustible) mientras que la fracción soluble, o hidrocarburo, permanece igual o aumenta<sup>36</sup>.

**3.9.3 Biogas:** El biogas está formado principalmente por metano y bióxido de carbono<sup>37</sup>. Se obtiene por medio de la *biodigestión* anaerobia que consiste en degradar sin la presencia de aire la materia orgánica con microorganismos, a una temperatura adecuada. El biogás obtenido (metano en su mayor parte) puede ser empleado para generar energía eléctrica o mecánica mediante su combustión, ya sea en plantas industriales o para uso doméstico.

<sup>36</sup> Wikipedia. *Biodiesel*. Diciembre., 2004. <http://es.wikipedia.org/wiki/Biodi%C3%A9sel>. (Dic 29, 2004)

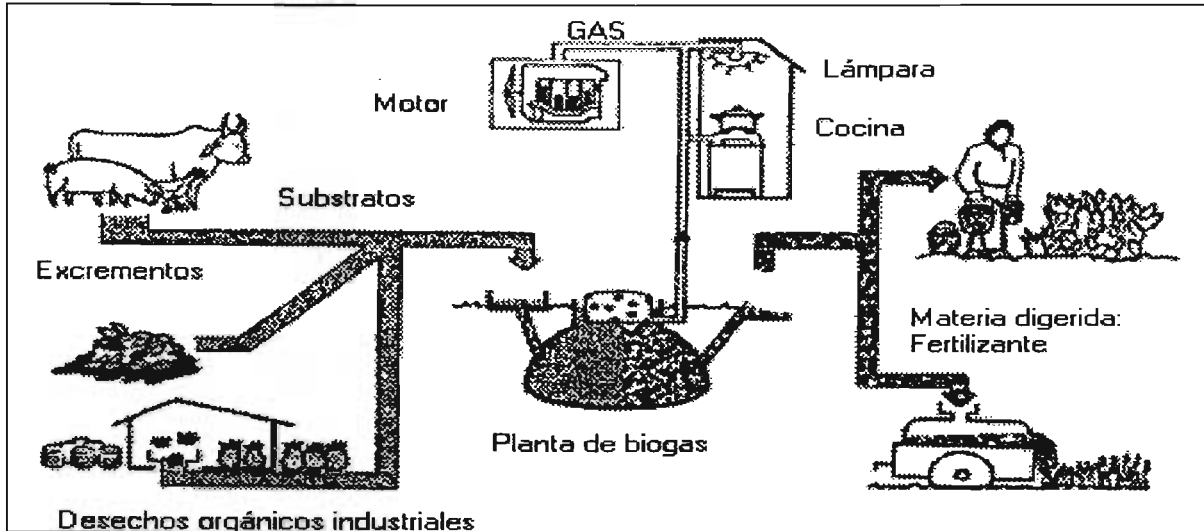
<sup>37</sup> Metano (CH<sub>4</sub>): 40-70% v/v

Bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): 30-60% volumen

Otros gases: 1-5% v/v (0-1% vol de H<sub>2</sub> y 0-3% vol de H<sub>2</sub>S)

La actividad microbiana libera alrededor de 700 millones de toneladas de metano a la atmósfera, de hecho cerca del 90% del metano emitido a la atmósfera proviene de la descomposición de biomasa. El resto es de origen fósil relacionado con procesos petroquímicos.

Figura 3.5 Sistema Típico de Biogás



Fuente: OEKOTOP., [www3.gtz.de/gate/](http://www3.gtz.de/gate/)

Los sistemas de biogás ofrecen ventajas ambientales a través de la protección del suelo, el agua, el aire y la reducción de la deforestación, al representar una alternativa en la producción de energía (calor y electricidad) a través de la transformación de desechos orgánicos en fertilizantes de alta calidad que producen beneficios micro-económicos a través de la sustitución de energía y fertilizantes y macro-económicos en la generación descentralizada de energía con la reducción en los costos de importación y protección ambiental.

### 3.10 Resumen:

A lo largo de este capítulo se abordó la posición de los combustibles fósiles en México, sus reservas, propiedades y las perspectivas para uso en la generación de energía eléctrica en los próximos años. Se cubrió el estudio de algunos procesos importantes en la actualidad para la producción de combustibles y energía, generalidades sobre el proceso de combustión de un hidrocarburo y la participación de tecnologías en la mejora de la calidad del aire. Así mismo, se estudiaron las características, tecnologías y las perspectivas del hidrógeno como vector de desarrollo energético y finalmente se abordaron generalidades sobre los biocombustibles, su variedad, origen y aplicación.

### 3.11 Bibliografía

1. Bazán, V. "Análisis de riesgos en una planta de hidrodeseintegración catalítica". Facultad de Química, UNAM. 2002
2. Bazán V y Cruz M. "Assessment of electricity generation to 2011 using low sulfur fuel-oil in Mexico". 23<sup>rd</sup> IAEE North American Conference. 2003
3. Bazán, V. y Cano, T. "Carbón y Coque de carbón en el sector energético de México". Balance Nacional de Energía, Secretaria de Energía. 2003.
4. Comisión Federal de Electricidad. "Reporte Anual 2001". 2002.
5. Jiménez B. "La contaminación Ambiental en México". Limusa 2002. 925 p.
6. McQuity, W. D. "The Bi-Provincial Up grader H-Oil® Operation and Performance". IFP, Industrial Division. 1997. 12. p
7. Molero L. "Pollutant formation and interaction in the combustion of heavy liquid fuels". Torrington Place. University College London. London. England. 1998.
8. Ocampo R. "Combustión de emulsiones de agua en combustóleo y perspectivas de aplicación en México". Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas. 1998
9. Tissot B.O & Welte D.H., "El petróleo su formación y localización, Ciencia y desarrollo". Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. 1982.
10. Petróleos Mexicanos., "Anuario estadístico 2003". México. 2003
11. Secretaria de Energía., "Prospectiva del Sector Eléctrico 2003-2012". México. 2003
12. Secretaria de Energía., "Prospectiva de Petrolíferos 2002-2011". 2002
13. Secretaria de Energía (2001)., "Visión general del Gas Natural en México". 2001
14. U.S Department of Energy. Office of Fossil Energy - Hydrogen program plan., "Hydrogen from natural gas and coal: the road to a sustainable energy future". Hydrogen Coordination Group. June. 2003

#### Internet:

[www.journeytoforever.org/biofuel.html](http://www.journeytoforever.org/biofuel.html)

National Biodiesel Borrad / [German Appropriate Technology Exchange](#).

<http://www.econosur.com/notas/biodiesel2.htm>

---

## Capítulo 4. Eficiencia Ecológica de Combustibles Fósiles Mexicanos.

*Dejad las sombras y abrazad lo verdadero.  
No cambiéis el presente con el futuro.  
Sois el lebrél que se precipita en el río,  
Mientras desea la sombra de lo que tiene en la boca.  
Consejo no fue jamás de sabio o astuto  
Perder un bien por conseguir otro.  
¿Para qué buscáis un tan lejano proyecto,  
sí en vosotros mismos encontráis el paraíso?*

Giordano Bruno.

### 4.1 Introducción

En el capítulo anterior se abordaron generalidades sobre los principales combustibles útiles en la producción de energía eléctrica, su potencial, características y perspectivas que permitan tener los elementos suficientes para estudiarlos en un marco de planeación energética a futuro, haciendo uso de las herramientas de análisis presentadas en el capítulo 2. En este capítulo se realizará la aplicación del concepto de *eficiencia ecológica de emisiones gaseosas* ( $\epsilon_{\text{eco gas}}$ ), para la evaluación del impacto ambiental de los principales combustibles fósiles utilizados en la generación de energía eléctrica en México, así mismo, se analizarán variaciones en la calidad de un combustóleo mediante la utilización de tecnologías disponibles de refinación, a fin de evaluar su *eficiencia ecológica* con respecto a otros combustibles.

### 4.2 Análisis de Eficiencia Ecológica de los Combustibles Fósiles en México

En México las plantas termoeléctricas son una pieza clave en la generación de energía eléctrica, hoy en día, la combustión de hidrocarburos (combustóleo, gas, o diesel) ocupa actualmente el 65% de la capacidad de generación nacional y el 72% de la producción total de la energía eléctrica. Más de la mitad de la generación de electricidad en México depende del petróleo, y se proyecta que éste, junto con el carbón será eventualmente desplazado por el gas natural con las centrales de generación de electricidad de ciclo combinado a base de gas:

El importante papel que juega la industria eléctrica requiere del desarrollo de tecnologías que permitan la mitigación de los grandes volúmenes de emisiones gaseosas contaminantes generadas por la quema de combustibles fósiles, ya que la alta dependencia en el país hacia estos combustibles para la generación de energía eléctrica conlleva a la producción de altos volúmenes de gases contaminantes del aire o causantes del efecto invernadero.



La introducción del indicador de *eficiencia ecológica* ( $\varepsilon_{\text{eco gas}}$ ), presentado en la sección 2.12, permite hacer una evaluación numérica de la calidad del combustible empleado en cuanto a sus implicaciones hacia la contaminación del aire, mediante la evaluación del impacto ambiental generado durante la quema de hidrocarburos en las centrales termoeléctricas con diferentes tipos de combustibles fósiles.

Para la evaluación de la *eficiencia ecológica de emisiones gaseosas* o *eficiencia ecológica* es necesario disponer de los siguientes tres elementos: 1) conocer la *eficiencia térmica bruta* de la tecnología de generación a estudiar, 2) contar los volúmenes de los contaminantes generados por la tecnología y 3) la normatividad ambiental vigente para el caso de estudio. Estos dos últimos, a fin de realizar la determinación de la ecuación de “*equivalente de bióxido de carbono*”.

La determinación de los indicadores de “*equivalente de bióxido de carbono*”, “*indicador de polución*” y la “*eficiencia ecológica*”, se realiza bajo la metodología propuesta por Cárdu<sup>38</sup> y que queda sintetizada en la ecuación de *eficiencia ecológica*:

$$\varepsilon_{\text{eco gas}} = \sqrt{\left(\frac{0.204\eta}{\eta + \Pi g}\right) \ln(135 - \Pi g)} \quad (23)$$

Donde  $\Pi g$  es el *indicador de polución* y  $\eta$  es la *eficiencia térmica* del proceso:

$$\Pi g \text{ [kg CO}_2\text{/MJ]} = \frac{(CO_2)_e}{Q_i} \quad (16)$$

El término  $Q_i$  es el poder calorífico inferior (PCI) y  $(CO_2)_e$  es el índice de *bióxido de carbono equivalente* para México,  $[(CO_2)_e]$  y que está en función de los volúmenes de emisiones gaseosas de distintos gases contaminantes con impacto local y regional:

$$(CO_2)_e = (CO_2) + 7(SO_x) + 50(NO_x) + 167(PST) + 794(CO) \quad (11)$$

En las tablas siguientes<sup>39</sup> se muestran los volúmenes de las emisiones de gases generados por año y por tipo de combustible en México, para todas las centrales que funcionan con gas, carbón, combustóleo y diesel respectivamente; y con los cuales se realizará el cálculo de *eficiencia ecológica* ( $\varepsilon_{\text{eco gas}}$ ), hecho con los valores de *eficiencia bruta del proceso* ( $\eta$ ), poder calorífico inferior y densidad, respectivos a cada combustible empleado:

<sup>38</sup> Cárdu M, Baica M. Regarding a global methodology to estimate the energy-ecologic efficiency of thermopower plants. *Energy Conversion & Management* 1999; 40(1); 71-78

<sup>39</sup> Secretaría de Energía: Energía y Medio Ambiente Hacia el Desarrollo Sustentable. SENER– SEMARNAT 2002. ANEXO 2. Emisiones históricas del Sector eléctrico Nacional (1994 – 2001)

**Tabla 4.1: Emisiones Anuales de Gases Contaminantes Provenientes de Gas Natural**

Gas Natural	Consumo	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO	NOx	NM VOC	SO <sub>2</sub>	PST	(CO <sub>2</sub> )e	Πg	ε eco gas
[año]	(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /año)	[Ton/año]								[Kg/Kg]	[Kg/MJ]	(%)
1995	5226.141	9498416	530	243	6362	23645	335	124	649	5.09	0.098	91.65
1996	5402.023	9818079	545	251	6565	24393	347	128	671	5.08	0.098	91.65
1997	5902.105	10726968	587	272	7124	26423	382	141	733	5.07	0.097	91.67
1998	6990.142	12704456	696	323	8439	31303	453	167	868	5.07	0.097	91.67
1999	7757.052	14098301	832	369	9694	36259	480	180	966	5.14	0.099	91.57
2000	9512.087	17288045	1084	463	12242	46108	565	215	1187	5.21	0.100	91.47
2001	11328.623	20589566	1382	568	15081	57228	639	249	1417	5.28	0.102	91.36

PCI: 52 MJ/Kg, ρ: 0.596 g/L, η: 51.15%

NM VOC : Non-Methane Volatile Organic Compounds

**Tabla 4.2: Emisiones Anuales de Gases Contaminantes Provenientes de Carbón**

Carbón	Consumo	S	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO	NOx	NM VOC	SO <sub>2</sub>	PST	(CO <sub>2</sub> )e	Πg	ε eco gas
[año]	(10 <sup>3</sup> t/año)	(%)	[Ton/año]								[Kg/Kg]	[Kg/MJ]	(%)
1995	7554.313	1	11070102	171	274	1715	82266	137	120038	6705	2.45	0.105	88.34
1996	8984.217	1	13165486	204	326	2039	97838	163	142759	7974	2.45	0.105	88.34
1997	8852.705	1	12972768	201	321	2010	96406	160	140669	7858	2.45	0.105	88.34
1998	9345.08	1	13694295	212	339	2121	101768	169	148493	8295	2.45	0.105	88.34
1999	9468.349	1	13874934	215	344	2149	103110	171	150452	8404	2.45	0.105	88.34
2000	9566.105	1	14018186	217	347	2172	104175	173	152005	8491	2.45	0.105	88.34
2001	11071.852	1	16224710	251	402	2513	120572	200	163192	9827	2.44	0.11	88.38

PCI: 23.235 MJ/Kg, pr: 0.9, η: 37.39%

**Tabla 4.3: Emisiones Anuales de Gases Contaminantes Provenientes de Combustóleo**

Combustible	Consumo	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO	NOx	NMVOC	SO <sub>2</sub>	PST	(CO <sub>2</sub> )e	Πg	ε eco gas
[año]	(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /año)	[Ton/año]							[Kg/Kg]	[Kg/MJ]	(%)	
1995	16752	50880097	645	218	10778	83922	1510	1123805	71370	5.07	0.12	87.1
1996	17121	51999249	671	222	11115	86844	1538	1150495	72815	5.08	0.12	87.09
1997	19808	60161521	774	259	12858	99311	1787	1341865	85238	5.09	0.12	87.07
1998	21680	65848475	782	284	13468	106408	1961	1470507	93531	5.06	0.12	87.12
1999	21287	64653931	787	278	13399	105182	1924	1438384	91465	5.07	0.12	87.11
2000	22896	69539737	845	300	14413	112355	2074	1551542	98882	5.07	0.12	87.11
2001	22109	67149474	833	289	14063	109694	1998	1499452	95282	5.08	0.12	87.09

PCI: 43 MJ/Kg, pr: 0.982, η: 37%

**Tabla 4.4: Emisiones Anuales de Gases Contaminantes Provenientes del Diesel**

Diesel	Consumo	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO	NOx	NMVOC	SO <sub>2</sub>	PST	(CO <sub>2</sub> )e	Πg	ε eco gas
[año]	(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /año)	[Ton/año]							[Kg/Kg]	[Kg/MJ]	(%)	
1995	269.469	726413	6	1	476	5156	151	2208	57	6.15	0.13	86.5
1996	244.741	659721	5	1	533	5216	176	2030	55	6.67	0.14	85.6
1997	342.146	922305	7	0	670	7253	219	2865	74	6.46	0.13	86.0
1998	500.445	1349033	12	1	964	10563	309	4208	107	6.42	0.13	86.0
1999	454.21	1224431	14	1	798	9255	240	3860	102	6.22	0.13	86.4
2000	660.55	1780692	16	1	1045	13235	322	5641	141	6.03	0.13	86.7
2001	457.606	1233530	19	1	1043	9814	313	3817	98	6.78	0.14	85.4

PCI: 48 MJ/Kg, pr: 0.837, η: 38%

Después de haber evaluado con la ecuación número (23) los datos reportados en las tablas (4.1 a 4.4), podemos ver que las variaciones de *eficiencia ecológica* con respecto a varios combustibles en sus valores medios para el año 2001:

Tabla 4.5: **Eficiencia Ecológica de los Combustibles Fósiles en México**

Combustible	$(CO_2)_e [Kg_{CO_2} / Kg_F]$	PCI $[MJ / Kg_F]$	$\Pi g [Kg CO_2/MJ]$	$\varepsilon_{eco gas}$
Diesel	6.78	48	0.14	85.41
Combustóleo	5.08	43	0.12	87.09
Carbón	2.44	23.2	0.11	88.38
Gas Natural	5.28	52	0.08	91.36

Fuente: Elaboración propia

Para los cuatro tipos de generación se encuentran valores aceptables de *eficiencia ecológica*, todos por arriba del 50%, y se encuentra una tendencia constante en valor en el periodo de estudio, teniendo muy ligeras variaciones que están en función de la operación y calidad de los combustibles empleados. La jerarquía de la *eficiencia ecológica* en México tiene la siguiente estructura para los combustibles estudiados:

$\varepsilon_{eco gas}$ : Gas natural > Carbón > Combustóleo > Diesel

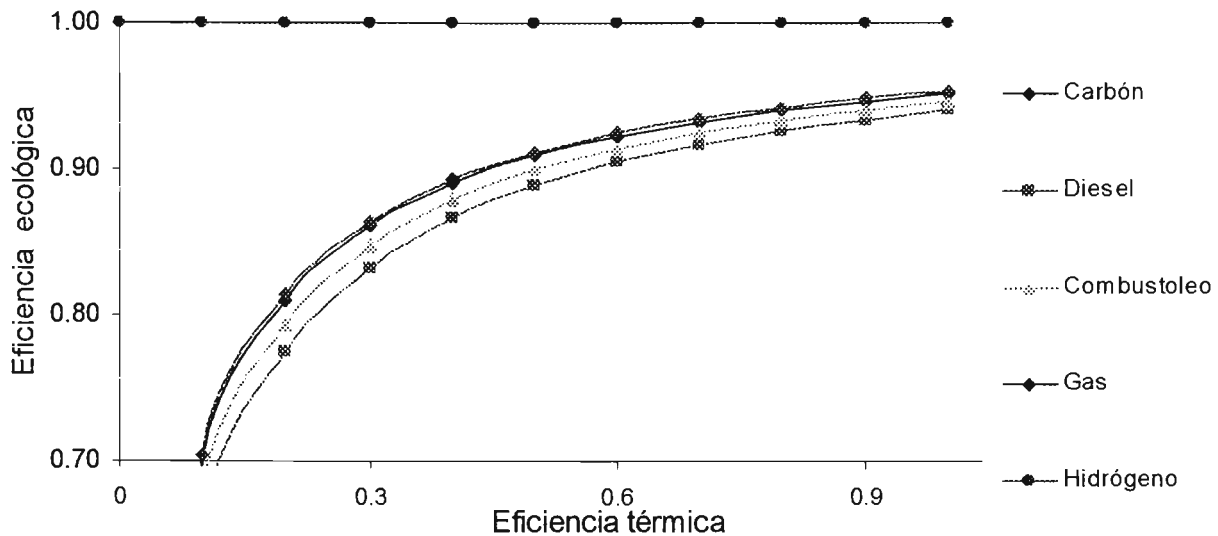
Esta configuración se justifica si se considera que en el caso del *gas natural* se tienen bajos volúmenes de gases contaminantes generados, pues su combustión produce principalmente bióxido de carbono y agua, ya que los contenidos de azufre, nitrógeno y partículas son muy bajos para este combustible. En el caso del *carbón* se ven reflejados los sistemas de control de emisiones que tienen las chimeneas de las centrales carboeléctricas y la calidad del carbón alimentado que básicamente está constituido por carbón, azufre y cenizas, y que son efectivamente mitigadas con desulfuradores, reductores catalíticos y precipitadores electrostáticos. En el caso del *combustóleo* la diferencia se explica por que su combustión es más controlada y por ende sus emisiones gaseosas son menores que en las máquinas diesel, pues la maquinas diesel son de menor capacidad y no hay un control de emisiones tan estricto, como el de una planta de mayor capacidad.

Esta estructura se debe y puede cambiar según las siguientes variables:

- Cambios en la calidad de los combustibles
- Cambios en la normatividad de emisiones (estándares).
- Aplicación de tecnologías que mitiguen el volumen de las emisiones
- Mejoramiento de la *eficiencia del proceso*
- Aparición de nuevas tecnologías de generación.

La siguiente gráfica presenta el perfil de *la eficiencia ecológica de emisiones gaseosas* de los combustibles fósiles estudiados, se presenta también el hidrógeno como caso límite para el cual fue definida la ecuación (23):

Gráfica 4.1: Eficiencias Eco gas para una Canasta de Combustibles Nacionales.



#### 4.3 Evaluación de la Diversificación de la Canasta de Combustibles Fósiles en México mediante la Eficiencia Ecológica de Emisiones Gaseosas

Al uso de combustibles pesados se le han atribuido algunos inconvenientes debidos en su mayoría a su composición química. Por ejemplo, las emisiones de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  y PST que provocan la contaminación del aire, smog fotoquímico y lluvia ácida, provienen del azufre, nitrógeno y carbón residual contenidos en el combustible. En el caso del  $\text{NO}_x$  una parte importante se genera por la oxidación del nitrógeno contenido en el aire.

Las partículas originadas por la quema de fracciones pesadas del combustible causan contaminación severa e impactan en la salud pública, originando también pérdidas económicas en operación por materia no-combustible. Las emisiones de partículas suspendidas totales (PST) y su fracción respirable (denominadas  $\text{PM}_{10}$  por su diámetro de partícula) dependen de lo completa que sea la combustión y en el caso de los combustibles pesados están relacionados con el grado de asfáltenos, cenizas, carbón residual y azufre presentes en el combustible.

Como se mencionó en la sección 3.3, los procesos de *hidrodesintegración catalítica* de aceites residuales además de aprovechar los fondos de barril productos de la destilación primaria en la Industria de Refinación y convertirlos en combustibles más ligeros y valiosos, también generan importantes reducciones en los niveles de azufre, nitrógeno, partículas y metales, presentes en los aceites pesados que se alimentan, trayendo como consecuencia un mejoramiento en la calidad de las gasolinas y combustibles.

El análisis de *eficiencia ecológica* ( $\epsilon_{\text{eco gas}}$ ) aplicado al uso de combustibles fósiles extraídos de procesos que mejoran la calidad de combustibles y gasolinas, indican en qué medida se mitigan las emisiones contaminantes producidas por estos combustibles ecológicos.

En el caso del proceso H-Oil actualmente utilizado en el Sistema Nacional de Refinerías (SNR) en la planta U-10 de Salamanca, Gto. con capacidad de 18,500 BPD y en el complejo HDR de Tula, Hgo. con una capacidad de 50,000 BPD; se encuentra que se pueden obtener grandes beneficios en la calidad de las gasolinas y combustibles empleados, a través de las reacciones de hidrodesulfuración (HDS), hidrodesnitrogenación (HDN), hidrodesmetalización (HDM) y las reacciones de hidrodesintegración de carbón residual (HDCCR), llevadas a cabo en estos procesos.

De acuerdo a lo definido en la sección 2.11, para el caso de México, el equivalente de bióxido de carbono, a condiciones de la normatividad vigente, es el siguiente:

$$(CO_2)_e = (1-\sigma_c)(CO_2) + 7(1-\sigma_s)(SOx) + 50(1-\sigma_n)(NOx) + 167(1-\sigma_{ps})(PST) + 794(1-\sigma_{co})(CO)$$

Tabla 4.6: **Características de Productos del Proceso H-Oil**

Proceso	Contaminante	$\sigma_x$ (% w/w)
HDS ( $\sigma_s$ )	S	65-90
HDN ( $\sigma_n$ )	N	40
HDCCR <sup>40</sup> ( $\sigma_{ps}$ )	Cenizas, Asfáltenos	40-50
HDM ( $\sigma_M$ )	Metales	60-80

Por lo que el indicador  $[(CO_2)_e]$ , es determinado de la siguiente manera para las condiciones de reducción de contaminante (en el proceso H-Oil):

Catalizador fresco ( $\sigma_s = 0.9$ ,  $\sigma_N = 0.4$ ,  $\sigma_{PS} = 0.5$ ):

$$(CO_2)_e = (CO_2) + 0.7(SOx) + 30(NOx) + 83.5(PST) + 794(1-\sigma_{co})(CO) \quad (24)$$

Catalizador envenenado ( $\sigma_s = 0.65$ ,  $\sigma_N = 0.4$ ,  $\sigma_{PS} = 0.4$ ):

$$(CO_2)_e = (CO_2) + 2.45(SOx) + 30(NOx) + 54.4*(PST) + 794(1-\sigma_{co})(CO) \quad (25)$$

Operación normal (promedio):

$$(CO_2)_e = (CO_2) + 1.6(SOx) + 30(NOx) + 69*(PST) + 794(1-\sigma_{co})(CO) \quad (26)$$

Evaluando el combustóleo generado con el proceso comercial H-Oil bajo el concepto de *eficiencia ecológica* tenemos, que la configuración de los combustibles tiene la siguiente forma:

<sup>40</sup> **Micro-carbón residual (Ramsbottom y Conradson):** Las Prueba Ramsbottom y Conradson son tres métodos de prueba para determinar el carbón residual formado durante la combustión del diesel o combustóleo, o asfaltos bajo una reducido suministro de aire, el residuo contiene partículas de combustible que no fueron completamente quemadas y también ceniza generada por el combustible en la combustión.

Tabla 4.7: Eficiencia Ecológica Promedio de Combustibles Fósiles Mexicanos

Combustible	$(CO_2)_e [Kg_{CO_2} / Kg_F]$	PCI $[MJ / Kg_F]$	$\Pi_g [MJ / Kg_{CO_2}]$	$\eta_{eco\ gas} (\%)$
Diesel	6.78	48	0.14	85.41
Combustóleo	5.08	43	0.12	87.09
Carbón	2.44	23.2	0.11	88.38
Combustóleo (H-Oil)	4.17	45	0.092	89.44
Gas Natural	3.46	52	0.055	91.36

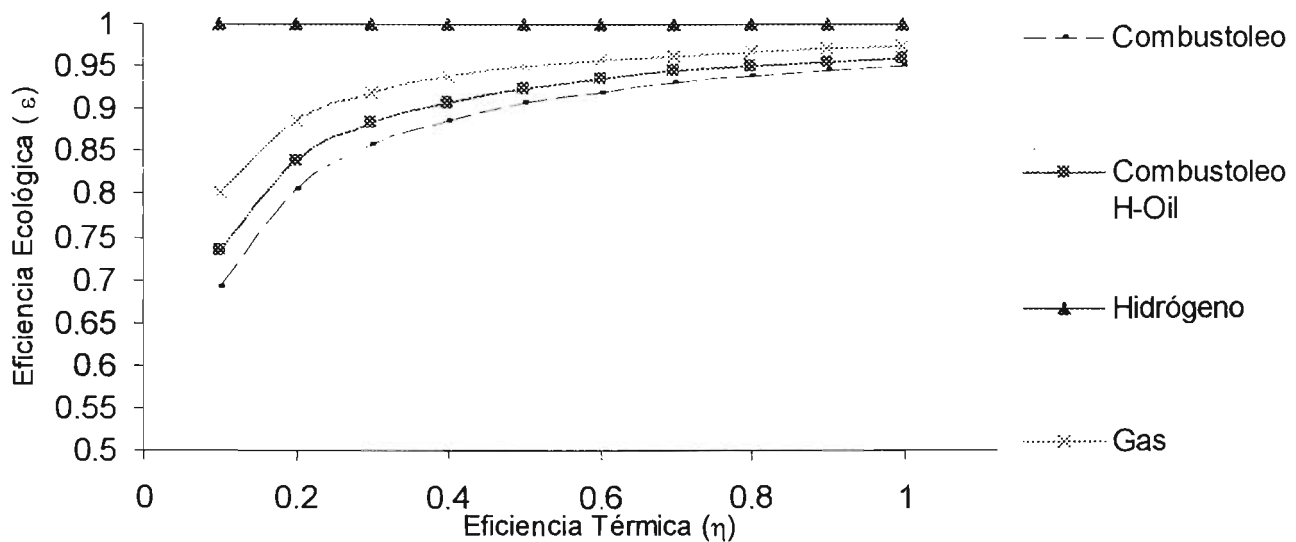
La jerarquía de la *eficiencia ecológica* Eco gas para la canasta de combustibles (incluyendo al combustóleo ecológico), es la siguiente:

$\eta_{eco\ gas}$ : GN > Combustóleo ecológico > Carbón > Combustóleo convencional > Diesel

#### 4.4 Conclusiones

En la siguiente gráfica se presenta la evaluación de la ecuación de *eficiencia ecológica* para valores de *eficiencia térmica* de 0 a 1, es decir, de 0 a 100%<sup>41</sup>, encontrando la importancia de operar las centrales a los mayores valores de eficiencia posibles.

Gráfica 4.2: Posición del Combustóleo Ecológico respecto a otros Combustibles



El estudio anterior demuestra la necesidad de invertir tanto en las tecnologías apropiadas para la mitigación de las emisiones de gases contaminantes como en la calidad de los combustibles, pues se tiene mayor sensibilidad de la *eficiencia ecológica* para el *combustóleo ecológico* a niveles de *eficiencia térmica* menores al 50%, de tal suerte que, resulta más apropiado ambientalmente invertir en tecnologías enfocadas a la reducción de emisiones, que esperar incrementar la *eficiencia térmica*.

<sup>41</sup> La segunda ley de la termodinámica indica la imposibilidad de convertir todo el calor absorbido por un sistema en trabajo, y el teorema de Carnot establece que ninguna *máquina térmica* puede tener una eficiencia mayor a la eficiencia de la máquina de Carnot, que es una máquina reversible. En este caso se presentó la gráfica 4.2 con valores de eficiencia térmica mayores a los posibles, con la finalidad de estudiar la variación de la eficiencia  $\epsilon_{eco\ gas}$  contra la eficiencia térmica ( $\eta$ ). En el anexo A4, se muestran las eficiencias típicas de centrales termoeléctricas para todos los combustibles estudiados.

## 4.5 Bibliografía

1. Bazán V. *Determinación de la eficiencia ecológica en la generación de electricidad con fuentes fósiles en México*. MASXXI, Sta Clara, Cuba. 2003.7 p.
2. Billon, A. et al. *Residue Upgrading Technologies: Converting Black Fedds to Water White Distillates*. IFP Industrial Division.1998
3. Cárdu M y Baica M. *Regarding a global methodology to estimate the energy-ecologic efficiency of thermopower plants*. Energy Conversion & Management 1999; 40(1); 71-78
4. Cárdu M, Baica M. *Regarding a new variant methodology to estimate globally the ecologic impact of thermopower plants*. Energy Conversion & Management 1999; 40 (14); 1569-75
5. Coylar J.J and Wisddom L. "The H-Oil Process: A World Leader in Vaccum Residue processing" 1997. National Petroleum Refiners Association Annual Meeting, TX. USA.
6. Energy Information Admistration. (2002). *An Energy Overview of México*. U.S Departament of Energy. [www.eia.doe.gov](http://www.eia.doe.gov)
7. He, B., Chen, C., "Energy ecologic efficiency of coal fired plant in China", Energy and Management 2002; 43(14); 1569-75
8. Jiménez B., *La contaminación ambiental en México: Causas, efectos y tecnología apropiada*, Limusa 2001; 677-690
9. Normas Oficiales Mexicanas: NOM-021-SSA1-1993. y NOM-085-ECOL-1994
10. Ocampo Barrera René. *Combustión de emulsiones de agua en combustóleo y perspectivas de aplicación en México*. Artículos técnicos/ Boletín IIE, mayo-junio. 1998
11. Secretaria de Energía: *Energía y Medio Ambiente Hacia el Desarrollo Sustentable*. SENER– SEMARNAT 2002. ANEXO 2. Emisiones históricas del Sector eléctrico Nacional (1994 – 2001)
12. Silva, E. et al. "Comparative analysis of environmental impacts of thermal power technologies in the Brazilian energy sector". In ECOS 2003 Proceedings, Universidad Federal de Itajubá, Brazil. 2003



---

## Capítulo 5. Costos Económicos de Emisiones Gaseosas Contaminantes.

*Los efectos ambientales del uso de la energía son serios y difíciles de manejar. La necesidad de reducir los costos ambientales será la principal razón en el incremento de los costos de la energía.*

Hans Landsberg<sup>42</sup>.

### 5.1 Introducción

La conferencia de las Naciones Unidas en Kyoto, Japón en Diciembre de 1997 tuvo como fruto el documento conocido como *protocolo de Kyoto* en el cual se establece que los países desarrollados deben reducir sus emisiones de gases causantes del efecto invernadero. Lo cual puede ser logrado mediante la inversión en nuevas tecnologías, mejoramiento de la *eficiencia energética*, uso de fuentes de energía renovable o nuclear, utilizando sistemas para la captura o secuestro de CO<sub>2</sub>, evitando el consumo de combustibles fósiles, o bien, presentando "*certificados de reducción de emisiones*". El valor de los certificados aún no se fija, sin embargo, se puede usar como punto de partida para asociar el costo económico de una mezcla de emisiones gaseosas producidas con combustibles fósiles en función de su impacto ambiental relativo a una unidad de masa o volumen de CO<sub>2</sub>. Este capítulo consiste precisamente en la evaluación del costo económico de todas las emisiones gaseosas contaminantes con efectos escala local, regional y global generados con combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica en México, tomando como punto de referencia el precio del certificado impuesto de emisión de una tonelada de CO<sub>2</sub>.

### 5.2 Impacto Local y Global a la Contaminación del Aire por Emisiones Gaseosas.

El *protocolo de Kyoto* ha representado un paso importante en contra de la producción masiva de gases causantes del efecto invernadero (GEI's), de tal suerte, que para estabilizar la concentración de estos gases en la atmósfera, se debe tener una reducción en los volúmenes de emisión de 50% menor que los niveles de 1990. Sin embargo, los escenarios a nivel mundial siguen considerando un uso intensivo de combustibles fósiles, que paulatinamente pueden ser reducidos por el uso de fuentes renovables, nuclear o bien con una transición hacia una *era del hidrógeno*. Todo esto ha dado lugar al planteamiento de un nuevo mercado de "certificados de emisión de carbono" que pudiera darse entre los países del *anexo B del Protocolo de Kyoto*<sup>43</sup>, donde las emisiones tendrían un valor determinado por la emisión de 1 Kg de bióxido de carbono.

---

<sup>42</sup> Joskow P. *Energy Policies and their consequences after 25 years*. The energy journal. IAEE. 24 (4), 2003.

<sup>43</sup> *Anexo B*: 38 países (*Anexo B*) deben reducir emisiones 6-8% por debajo del nivel de 1990, con algunas excepciones; Las economías en transición deben reducir 0-8% debajo de los niveles de 1990, pero, la mayoría ahora están por debajo de sus límites de emisiones, con relación a 1990.

El IPCC ha dado a conocer en qué medida los GEI contribuyen al *calentamiento global del planeta* en relación con su equivalencia de bióxido de carbono (principal gas asociado al fenómeno), sin embargo, mientras se establece un nuevo mercado que “ponga a la venta de agujeros en la capa superior de ozono”, es pertinente proponer el *considerar los efectos locales dentro del costo asociado a las emisiones de GEI*, ya que si bien los “certificados de reducción de emisiones” pueden llegar a considerar a diferentes gases con potencial de calentamiento global (GPW) equivalente al CO<sub>2</sub>, no se han considerado los gases con un efecto local directo.

### 5.3 Determinación del Contaminante Integral

En el capítulo 2, se presentó el concepto de “*equivalente de bióxido de carbono*” como una herramienta para evaluar en términos de CO<sub>2</sub> la contribución de los gases contaminantes con efectos locales a la salud o a fenómenos ambientales como la lluvia ácida o la formación de *smog*; y que delimitan su contribución en términos de CO<sub>2</sub> en función de su *estándar de emisión*, definido por la legislación ambiental local.

La ecuación de *bióxido de carbono equivalente* (presentada en la sección 2.11), considera impactos locales y regionales al medio ambiente (atmósfera) y la salud en términos de bióxido de carbono:

$$(CO_2)_e = (1-\sigma_c)(CO_2) + 7(1-\sigma_s)(SOx) + 50(1-\sigma_n)(NOx) + 167(1-\sigma_{ps})(PST) + 794(1-\sigma_{CO})(CO)$$

Considerando tanto los impactos ambientales locales y regionales, como los impactos globales de los gases contaminantes generados en un proceso de combustión a lo largo de una cadena de producción, se define un *contaminante integral* [(CO<sub>2</sub>)<sub>T</sub>], que contenga ambos efectos, donde la contribución de cada efecto local o global tenga equivalencia en términos de bióxido de carbono:

$$\langle CO_2 \rangle_T = \sum_i [\text{Im pactos} \cdot \text{Locales}] + \sum_i [\text{Im pactos} \cdot \text{Globales}] \quad (27)$$

Donde el contaminante integral (CO<sub>2</sub>)<sub>T</sub> tiene unidades de (Kg CO<sub>2</sub>/Kg combustible)

$$\langle CO_2 \rangle_T = (CO_2)_e + (CO_2)_{GWP} \quad (28)$$

Donde:

(CO<sub>2</sub>)<sub>T</sub>, es el contaminante Integral

(CO<sub>2</sub>)<sub>e</sub>, es el equivalente de bióxido de carbono para gases con efectos local y regional.

(CO<sub>2</sub>)<sub>GWP</sub> es el equivalente de bióxido de carbono para gases con efecto global.

Desarrollando la ecuación (28) en base a la definición anterior, tenemos:

$$(CO_2)_T = (1-\sigma_c)(CO_2) + \frac{10000}{ES(SO_2)} (1-\sigma_s) (SOx) + \frac{10000}{ES(NO_x)} (1-\sigma_n)(NOx) + \frac{10000}{ES(PST)} (1-\sigma_{ps})(PST) + \frac{10000}{ES(CO)} (1-\sigma_{ps})(PST) + GWP(1-\sigma_{CH_4})(CH_4) + GWP(1-\sigma_{N_2O})(N_2O) + GWP(1-\sigma_{NVOC})(NMVOC)$$

Donde:

$(1 - \sigma_x)$  es el "índice de eliminación de un gas contaminante", que es la fracción masa del contaminante "x", eliminado por proceso de limpieza de combustible (tabla 2.9).

**GWP**, es el *potencial de calentamiento global* de los GEI's; y

**ES**, es el *estándar ambiental* (Environmental Standard) vigente en el lugar donde se evalúe el efecto de los gases con efecto local en  $mg/m^3$ .

Los coeficientes para esta ecuación quedan definidos bajo las siguientes tablas:

Tabla 5.1: **Estándares de Calidad Ambiental en México [ $mg/m^3$ ]**

Gas	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PST	CO
Estándar Ambiental (ES)	10000	233	206	60	12.6
Coeficiente	1	43	50	167	794

Tabla 5.2: **Potenciales de Calentamiento Global del Planeta<sup>44</sup>**

Gas	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	SF <sub>6</sub>	CF <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>
Coeficiente (GWP)	1	23	296	22200	1

Sustituyendo los valores de los coeficientes, el *contaminante integral* queda:

$$(CO_2)_T = (1-\sigma_c)(CO_2) + 7(1-\sigma_s)(SOx) + 50(1-\sigma_n)(NOx) + 167(1-\sigma_{ps})(PST) + 794(1-\sigma_{CO})(CO) + 23(1-\sigma_{CH_4})(CH_4) + 296(1-\sigma_{N_2O})(N_2O) + 1(1-\sigma_{NVOC})(NMVOC)^{45} \quad (29)$$

Para la evaluación de este indicador se requieren conocer los volúmenes de las emisiones gaseosas generadas por cada tipo de combustible en el periodo de tiempo deseado, los valores de  $\sigma_x$  se sustituirán en la ecuación cuando existan mejoras tecnológicas o en la calidad del combustible, eliminando elementos que durante la combustión generarán emisiones indeseadas.

Los *impactos globales*  $[(CO_2)_{GWP}]$  quedan asociados a los gases causantes del fenómeno del calentamiento global del planeta, y dependen de los *potenciales de calentamiento global* (GWP) definidos por el Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) y de los volúmenes de gases causantes del efecto invernadero, emitidos a la atmósfera.

<sup>44</sup> Ver anexo A10.

<sup>45</sup> Non-Methane Volatile Organic Compounds: Se tomó el GWP del éter como referencia para los NMVOC.

## 5.4 Costo Económico asociado a Emisiones de Gases Contaminantes

El costo total de emisiones de chimenea ( $T_x$ ) para un combustible específico puede ser evaluado mediante la siguiente ecuación:

$$T_x = CT * (CO_2)_T * m_F \quad (30)$$

Donde:

$T_x$ : Costo total de emisiones de chimenea para un combustible específico "x"

CT: Carbon Tax (USD/Kg CO<sub>2</sub>)

(CO<sub>2</sub>)<sub>T</sub>: Contaminante Integral (Kg CO<sub>2</sub>/Kg combustible)

$m_F$ : Flujo de Combustible (Kg/s)

Análisis dimensional de  $T_x$ : 
$$\frac{\$}{Kg \cdot CO_2} \cdot \frac{Kg \cdot CO_2}{Kg_F} \cdot \frac{Kg_F}{s} = \frac{\$}{s}$$

El Costo Total de Emisiones de Chimenea ( $T_x$ ), se define para asociar el *costo económico de una mezcla de contaminantes gaseosos emitidos a la atmósfera mediante cualquier proceso de combustión*, tomando como referencia al bióxido de carbono en materia de estándares de emisión, volúmenes generados, características del combustible, impacto al calentamiento global del planeta y el costo específico por la emisión de CO<sub>2</sub> (CT).

En el caso del *contaminante Integral* [(CO<sub>2</sub>)<sub>T</sub>] se debe hacer notar que los impactos locales [(CO<sub>2</sub>)<sub>e</sub>] están sujetos a los *estándares de calidad del aire* (Air Quality Standard, AQS), que se tengan en cada país para los gases contaminantes que tienen efectos de incidencia directa en la zona donde se emiten, por los daños causados a la salud humana o sus fenómenos locales consecuentes como: la lluvia ácida y el smog fotoquímico. La contribución de los *impactos locales* es función de la normatividad vigente en cada país, por lo que puede variar el valor de [(CO<sub>2</sub>)<sub>e</sub>], según el lugar. No existen pulmones de primera o segunda clase por lo que las máximas concentraciones permitidas deben ser equivalentes en todas las legislaciones ambientales del mundo, de tal suerte que los coeficientes que integran al factor [(CO<sub>2</sub>)<sub>e</sub>] sean también aplicables a nivel mundial como en el caso del factor [(CO<sub>2</sub>)<sub>GWP</sub>].

Para el caso de la evaluación nacional de este indicador se define el costo total anual de emisiones-combustible ( $AT_x$ ) como el *costo económico total generado por las emisiones contaminantes gaseosas producidas anualmente por un solo combustible en un país y que tengan impactos al medio ambiente en sus dimensiones local o global, dividido entre la cantidad de energía eléctrica producida por éste anualmente*.

$AT_x$ : Costo total anual de emisiones-combustible en millones (\$/GWh)

Análogamente, el *costo total anual de emisiones-país* (AT) se define como las *emisiones contaminantes gaseosas producidas anualmente en un país, sin distinción de las fuentes que los producen, y es la suma de todas las fuentes que contribuyen en la generación de emisiones sin distinción del sector al que representen:*

$$AT(\text{México}) = \sum_{i=1}^n AT_x \quad (31)$$

Determinando, estos indicadores para los volúmenes generados durante el año 2001, en base a la tabla 5.3, se tienen los siguientes resultados:

Tabla 5.3: **Emisiones de Gases Contaminantes Totales en México 2001.** [Ton/año]

Combustible	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO	NOx	NMVOC	SO <sub>2</sub>	PS
GN	20589566	1382	568	15081	57228	639	249	1417
Carbón	16224710	251	402	2513	120572	200	63192	9827
Combustóleo	67149474	832	288	14063	109693	1997	1499452	95282
Diesel	1233530	19	1	1043	9814	313	3817	98

Fuente: Secretaría de Energía: Energía y Medio Ambiente Hacia el Desarrollo Sustentable. SENER- SEMARNAT 2002. ANEXO 2. Emisiones históricas del Sector eléctrico Nacional (1994 – 2001).

Finalmente para el año 2001 en México se tienen los siguientes resultados:

Tabla 5.4: **Costo de Emisiones Contaminantes en la Producción de Electricidad.**

Combustible	$m_f^{46}$	(CO <sub>2</sub> ) <sub>T</sub>	CT <sup>(47)</sup>	T <sub>x</sub>	Generación <sup>48</sup>	AT <sub>x</sub>
México 2001	(Ton <sub>F</sub> /año)	[Ton(CO <sub>2</sub> )/Ton <sub>F</sub> ]	USD/Ton CO <sub>2</sub>	MM USD/año	GWh	USD/GWh
Comb. Ecol.	21,711,358	4.17	4.5	407.4	132,258	3,080
GN	6,751,859	5.16	4.5	156.7	30,551	5,131
Combustóleo	21,711,358	5.08	4.5	496.3	132,258	3,752
Carbón	11,071,852	2.46	4.5	122.5	21,287	5,758
Diesel	383,016	6.78	4.5	11.6	2,365	4,941

Notas: 1) El Comb. Ecol (Combustóleo Ecológico) es un combustóleo hipotético calculado con las propiedades físicas del combustóleo normal, pero considerando mejoras en su calidad de emisiones por procesos específicos [Ver sección 3.3 y 4.3]. 2) El Costo de las emisiones es en USD (dólares de Estados Unidos).

Por lo que el valor de AT (México, 2001)<sup>49</sup> = 19,583 USD /GWh

El valor de AT representa el *costo económico asociado a la generación de gases contaminantes por la quema de combustibles fósiles* en la generación bruta de energía en México en el año 2001, que en otros términos, representaría un costo de 787 MMUSD en este mismo año.

La jerarquía de AT queda:

AT<sub>x</sub> : Combustóleo Ecológico < Combustóleo < Diesel < GN < Carbón

<sup>46</sup> Memoria de cálculo en Anexos.

<sup>47</sup> Walet, K, Commodities Now, Hill Emissions Trading Ever Take Off?. December 2000. p. 10

<sup>48</sup> Estimado con datos de la *prospectiva del sector eléctrico* 2003-12, con un total de 197,106 GWh en 2001.

<sup>49</sup> No se considera al combustóleo ecológico en la suma, en caso de haber generado con este combustible, se tendría AT<sub>x</sub> = 18,911USD/GWh

## 5.4 Conclusiones

1. La contribución del factor  $(CO_2)_{GWP}$  es mayor con respecto al factor  $(CO_2)_e$ , en la determinación de la magnitud de  $(CO_2)_T$ , esto se debe a que el bióxido de carbono es el principal contaminante gaseoso emitido, y éste se asocia al factor  $(CO_2)_{GWP}$ , directamente pues sus impactos inciden en el calentamiento global del planeta, (a diferencia de lo visto en el capítulo 4). Sin embargo, este enfoque sólo puede tomarse cuando se evalúan conjuntamente los impactos locales, regionales y globales.

2. En la tabla 5.4 se puede observar que en términos del costo *total de emisiones de chimenea para un combustible específico* ( $T_x$ ) es directamente proporcional a los volúmenes de combustible empleados para la generación de energía y a los índices de  $CO_2$  equivalente.

Para el concepto de *eficiencia ecológica* se pudo observar en el capítulo 4, que la jerarquía para la relación  $CO_e$  / Energía consumida (asociada al concepto de *indicador de polución* ( $\Pi_g$ )), originó la configuración siguiente:

$\varepsilon_{eco\ gas}$ : GN > Combustóleo ecológico > Carbón > Combustóleo convencional > Diesel

Esta configuración es distinta a la relación que nos brinda el concepto de *costo total anual por emisiones  $CO_e$  / energía producida* ( $AT_x$ ), pues aunque las tecnologías y configuraciones de las centrales termoeléctricas pueden ser capaces de tener altas *eficiencias térmicas y ecológicas* en términos energético-ambientales, los costos por la generación de contaminantes pueden tener mayor importancia en la rentabilidad de un proceso ya que podría llegar a ser más costoso el no reducir el volumen de las emisiones contaminantes totales, que el mejorar la eficiencia de operación de una central termoeléctrica sin variar los volúmenes de emisión de éstas.

$AT_x$ : Combustóleo ecológico < Combustóleo < Diesel < GN < Carbón

3. Los estándares de emisiones gaseosas contaminantes que se adopten para gases con impactos ambientales en la legislación vigente en México, deben considerar los daños al ambiente y la salud que puedan traer este tipo de emisiones, tanto a nivel local y regional como global. Abriendo la pauta a correcciones en los estándares actuales reportados en las Normas Oficiales Mexicanas en materia de contaminación atmosférica; los cuales deben considerar los impactos locales a la salud y al ambiente con la misma rigurosidad que los países de primer mundo.

## 5.5 Bibliografía

1. Landsberg Hans (Study Group Chairman) (1979). *Energy: The Next Twenty Years*, A Report Sponsored by the Ford Foundation and Administered by Resources for the Future, Cambridge: Ballinger.
2. Joskow P. *Energy Policies and Their Consequences After 25 Years*. *The Energy Journal* 2003; 24 (4): 17-49
3. Brundtland GH et al., *Our common future*, World Commission on Environment and Development, 1987.
4. Silva E, Ribeiro S, Neves F., “*Comparative analysis of environmental impacts of thermal power technologies in the Brazilian energy sector*”. In ECOS 2003 Proceedings, Universidad Federal de Itajubá, Brazil, 2003
5. Cárdu M, Baica M. *Regarding a global methodology to estimate the energy-ecologic efficiency of thermopower plants*. *Energy Conversion & Management* 1999; 40(1); 71-78
6. Cárdu M, Baica M. *Regarding a new variant methodology to estimate globally the ecologic impact of thermopower plants*. *Energy Conversion & Management* 1999; 40 (14); 1569-75
7. Normas Oficiales Mexicanas: NOM-021-SSA1-1993. y NOM-085-ECOL-1994
8. *Commodities Now, Will Emissions Trading Ever Take Off?*. December 2000.

### Internet:

[http://www.hydrogen.org/wissen/pdf/BZ-Fahrzeuge\\_Hypothesis\\_Wu\\_LBST\\_17SEP2001.pdf](http://www.hydrogen.org/wissen/pdf/BZ-Fahrzeuge_Hypothesis_Wu_LBST_17SEP2001.pdf)

Asociación Americana del hidrógeno (American hydrogen Association: AHA)

<http://www@clean-air.org>

International Hydrogen Association <http://www.hydrogenus.org/h2-links.asp>

American Hydrogen Association <http://www.clean-air.org/>

Asociación Mexicana de Hidrógeno <http://genc.iie.org.mx/smh/smh2.html>

ESTA TESIS NO SALI  
DE LA BIBLIOTECA

---

## 6. Evaluación de las Eficiencias Ecológicas de la Sustentabilidad de Procesos de Generación de Energía con Hidrógeno.

*Las grandes potencias están buscando alternativas serias al petróleo a través de la obtención de energía del sol o el agua. Pedimos a Dios que éstas no tengan rápido éxito, por que nuestra posición en ese escenario será dolorosa.*

Sheik Ahmad Kaki Llamán, Ministro del petróleo de Arabia Saudita<sup>50</sup>.

### 6.1 Introducción

En este capítulo se presenta una evaluación energético-ambiental que busca confrontar las bondades y/o desventajas de dos cadenas de producción de hidrógeno, para lo que se describen 2 sistemas para su obtención: 1) la refinación del petróleo y 2) un proceso de producción empleando energía solar. La evaluación se realiza mediante la aplicación de la *eficiencia exergética sustentable* a las distintas cadenas de producción de combustibles (y no al consumo del mismo), y es útil para determinar el aprovechamiento de recursos disponibles en cada ruta de producción analizada.

### 6.2 ¿De dónde se obtendrá el hidrógeno?

El hidrógeno molecular (H<sub>2</sub>) no se encuentra naturalmente disponible en la tierra pero puede ser producido a partir de materiales que lo contienen. Este proceso requiere una fuente de energía primaria, tal como los combustibles fósiles, nuclear, o renovables. Los *combustibles fósiles* (gas natural y carbón, por ejemplo) pueden proveer la transición a la economía del hidrógeno como insumos para su producción entre el corto y mediano plazo. Con el secuestro de hidrógeno de fuentes que lo contienen se prevé que combustibles como el *gas natural* y el *carbón* pueden ser utilizados para producirlo por muchas décadas, pues tienen el potencial para ser recursos viables para producirlo en grandes cantidades. La producción y uso de hidrógeno derivado de carbón implicarán gran disminución en las emisiones de los gases de tipo invernadero, incluso sin considerar el secuestro de CO<sub>2</sub>. En un futuro no muy lejano, la producción de hidrógeno se podría soportar con *energía nuclear* o con fuentes de *energía renovable*, por medio de las cuales el calor y electricidad serían usados para separar el agua en hidrógeno y oxígeno.

Ante la posible coyuntura de una nueva era energética basada en el uso intensivo del hidrógeno como el principal combustible del mundo, aquí se presenta una evaluación energético-ambiental comparativa de las cadenas de producción de hidrógeno con combustibles fósiles y con fuentes de energía renovables. A continuación se describen dos sistemas para la producción de hidrógeno, en donde, se considera: 1) un sistema de producción basado en el mejoramiento de gasolinas en refinación del petróleo y 2) un sistema de producción con fuente de energía solar; en el primero la ruta para la generación de hidrógeno es por la vía de los combustibles fósiles y la segunda por la vía de fuentes renovables.

---

<sup>50</sup> United Press Internacional, resúmenes de las transmisiones de la televisión Saudita de Diciembre 21, 1976, después de la conferencia de la OPEP en Doha, Qatar.



### 6.3 Producción de Hidrógeno Mediante el Proceso de Reformado Catalítico

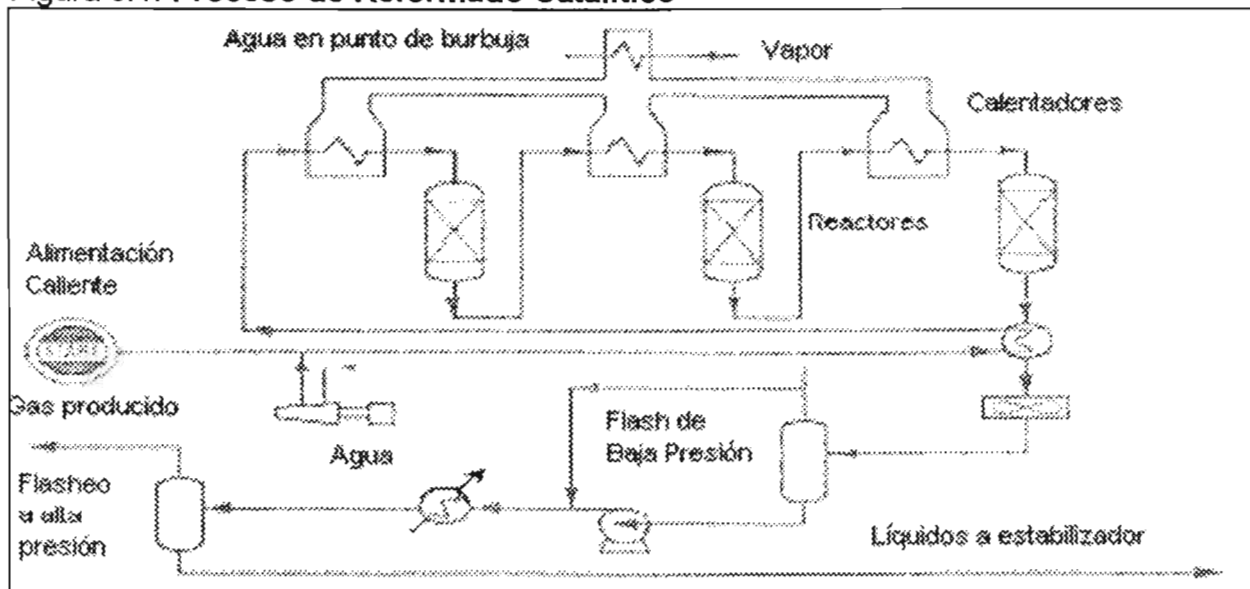
El análisis busca proporcionar un modelo de referencia para la *evaluación de la eficiencia exergética sustentable* en cualquier tecnología actual o venidera para la producción de combustibles.

El proceso de reformado catalítico fue escogido por su alta presencia a nivel mundial en la industria de refinación, considerando una economía que sostenga un uso intensivo del hidrógeno como energético, donde el reformado de combustibles fósiles será la solución más factible hasta que incremente la participación de las tecnologías de generación de  $H_2$  con recursos renovables. Actualmente el *reformado de vapor* que hace reaccionar vapor y metano es el *proceso de reformado* más conocido para la producción de hidrógeno, sin embargo el reformado puede realizarse para diferentes tipos y mezclas de combustibles fósiles.

El proceso a analizar en este caso es el *reformado catalítico*, el cual tiene la finalidad de incrementar el octano de la nafta para producir gasolina de alto octanaje e hidrógeno, y como productos secundarios GLP, gas combustible y vapor.

La alimentación al *proceso de reformado catalítico* consiste en parafinas, naftas y aromáticos (P/N/A % v/v) y continuamente puede variar 63/25/12, 52/42/6, etc.; dependiendo de las dinámicas de operación. El proceso consiste en un reformador semi-regenerativo de cama-múltiple sobre un catalizador de platino, con recirculaciones de hidrógeno al reactor en una tasa de 3 a 7 mol/ mol de alimentación. La alimentación de nafta con contenidos altos de azufre y nitrógeno puede ser hidrotratada, pero las alimentaciones con bajos contenidos de azufre (<10 ppm) debe ser reformada sin hidrotratamiento. Las condiciones del reactor van de los 875°F a los 1000°F y de 150 a 400 psig y los volúmenes de los productos dependerán de las características de la carga y las condiciones del reactor. En el siguiente diagrama se muestra el proceso de reformado catalítico de nafta para la producción de gasolinas de alto octanaje:

Figura 6.1: **Proceso de Reformado Catalítico**



Fuente: Hydrocarbon Processing. Nov 2002. p 96.

Tabla 6.1: **Consumos del Proceso de Reformado** (por MMpcd de H<sub>2</sub> Producido)

Unidad (18500 BPD Carga Negra)	Volumen / MMpcd de H <sub>2</sub> producido
Combustible liberado (10 <sup>3</sup> BTU)	340
Hidrógeno (ft <sup>3</sup> )	1150
Vapor producido (lb)	63
Agua de enfriamiento (Gal)	214
Electricidad (KWh)	34.16

Fuente: Basada en datos de Hydrocarbon Processing. Nov 2002. p 123.

En la tabla anterior se muestran algunos flujos de materia y energía del proceso, mediante los cuales se determina el balance de exergía del proceso (ver anexos).

#### 6.4 Evaluación de Eficiencia Exergética Sustentable por Vía Fuentes Fósiles.

En la tabla 6.2 se muestra un balance de exergía para una unidad de reformación catalítica con capacidad de 18,500 BPD y en la tabla 6.3 se determina el valor del factor de costo exergético unitario del proceso (valor de "k" en los productos)<sup>51</sup>.

Tabla 6.2: **Balance de Exergía de Proceso de Reformado**

Planta HDN (18500 BPD)	Flujo	Condiciones	E [MJ/vol, masa]	Ein [MJ/día]
<b>Recursos</b>	F			<b>105987700</b>
Agua (Ton/d)	15000	20°F	7.5 MJ/Ton	112500
Energía eléctrica (MWh/d)	632	-	-	2275200
Carga Negra (BPD)	18500	63P/25N/12A	5600MJ/b	103600000
<b>Productos</b>	P			<b>88569383</b>
Vapor (Ton/d)	528	12 bar, sat	845 MJ/Ton	446160
Hidrógeno (MCD)	555000	AER	10.58MJ/m <sup>3</sup>	5872233
GLP (BPD)	685	AER	3734 MJ/b	2557790
Reformado (BPD)	15700	MTBE	5076MJ/B	79693200
<b>Pérdidas + destrucción</b>	I			
Combustible (BPD)	3110		5600	<b>17418316</b>

Fuente: Basada en datos de Hydrocarbon Processing. Nov 2002. p 123.

$$\text{Flujo de H}_2 \text{ (g)} : 555000 \frac{m^3}{\text{día}} \cdot 0.0000899 \frac{\text{Ton}}{m^3} = 49.9 \frac{\text{Ton}}{\text{día}}$$

Tabla 6.3: **Evaluación de la Ruta de Combustibles Fósiles para Producir H<sub>2</sub>**

Recursos	GJ/Ton H <sub>2</sub>	k	Rc
Agua	2.25	1	1
Energía Eléctrica	45.6	2.58	0
Carga Negra	2076.15	1.17	0.0004
<b>Productos</b>			
Vapor	8.95	1.43	0
Hidrógeno	117.7	1.43	1
GLP	51.45	1.43	0.0004
Reformado	1597	1.43	0.0004

<sup>51</sup> Como se vio en la sección 2.5 (ecuación 9)  $k = 1/\eta_{ex}$

Evaluando la *Eficiencia exergética sustentable* se hace el cálculo de ambos procesos.

$$\eta_{eco} = \frac{1}{1 + \frac{\sum_i k_i E'_{in, no-renovable} (1 - \eta_{ex, cadena})}{\sum_j E_{out}}} \quad (8)$$

$$\eta_{eco} = \frac{1}{1 + \frac{[k_{agua} E_{agua} (1 - R_a) + k_{e.e} E_{e.e} (1 - R_{e.e}) + k_{c.negra} E_{c.negra} (1 - R_{c.n})] \cdot (1 - \eta_{ex, cadena})}{\sum_j E_{out}}}$$

Para este proceso la ecuación queda:

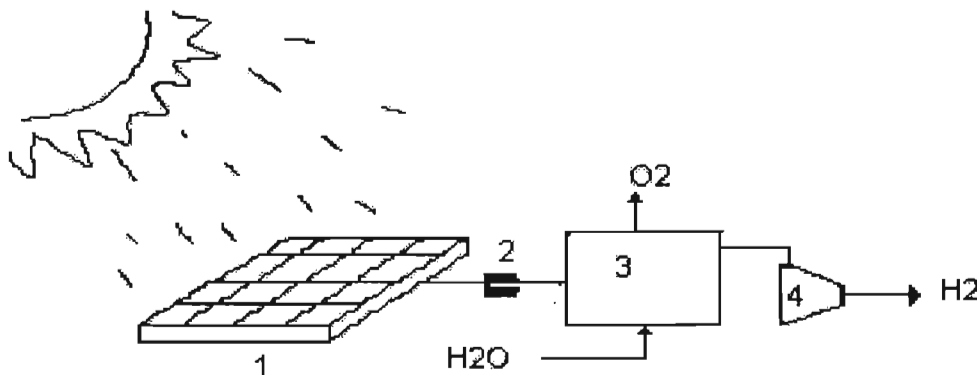
$$\eta_{eco} = \frac{1}{1 + \frac{[(45.6 \cdot 2.58) + (2076.15 \cdot 1.17)] \cdot (1 - 0.697)}{(8.95 + 117.7 + 51.45 + 1597)}} = \frac{1}{1 + \frac{(2545) \cdot (1 - 0.697)}{1775.1}} = 0.697$$

### 6.5 Producción de Hidrógeno con Energía Solar

El sistema que a continuación se plantea se basa en la obtención de hidrógeno a partir de energía solar y tiene la finalidad de generar hidrógeno para su almacenamiento. El sistema es denominado *ciclo del hidrógeno producido por ruta solar*. En este sistema el panel fotovoltaico tiene vital importancia pues transforma la energía solar a energía eléctrica. Sin embargo, el interés de éste sistema radica en la importancia de poder almacenar la energía que se produce, para poder utilizarla en las cantidades adecuadas cuando se necesite, "quemando" el hidrógeno almacenado.

El ciclo comienza cuando la energía solar es captada por un panel fotovoltaico que transforma la energía solar a energía eléctrica. El voltaje de energía eléctrica es regulado posteriormente para poder alimentar la unidad electrolítica la cual realiza la electrolisis del agua por medio del suministro de esta corriente eléctrica. Tanto el oxígeno como el hidrógeno producidos son almacenados para posteriormente ser consumidos en la celda de combustible. Se puede usar un compresor para este almacenamiento, y el oxígeno también puede ser tomado del aire.

Figura 6.2: Esquema de Producción de H<sub>2</sub> por Ruta Solar



Una celda de combustible puede utilizarse para generar energía eléctrica y agua a partir del hidrogeno y el oxigeno almacenados, un convertidor de corriente directa alterna AC/DC puede ser acoplado para utilizar la energía generada.

## 6.6 Evaluación de la Eficiencia Exergética Sustentable Mediante Fuente Solar

Análogamente a la ruta anterior, para el caso del sistema solar tenemos en la Tabla 6.4 un balance de exergía para una unidad de captación solar de 31m<sup>2</sup> y en las Tablas 6.5 y 6.6 se determina el valor del factor de costo exergético unitario del proceso (k).

Tabla 6.4: **Análisis del Sistema de Generación con Energía Solar**

Ciclo H <sub>2</sub> Solar (31m <sup>2</sup> )	Flujo	Condiciones	b° [MJ/vol, masa]	Ein [KJ/dia]
<b>Recursos</b>				<b>549085.15</b>
Energía Solar (KJ/d)	548827.4	Mex D.F (8h)		548827.4
Agua (Kg/d)	5.1	AER	7.5 KJ/Kg	38.25
E. Eléctrica Externa (KWh/d)	0.061	-	-	219.5
<b>Productos</b>				<b>67308</b>
Hidrógeno (Kg/dia)	0.567	AER	117716 KJ/Kg	66745
Oxígeno (Kg/dia)	4.536	AER	124.15 (KJ/Kg)	563
<b>Pérdidas</b>				<b>481790.15</b>
Energía Solar (KJ/d)	481790.15	Mex D.F (8h)		481790.15

Fuente: Basa en datos de Sánchez R, Pérez J. Dispositivo productor de electricidad para una casa habitación a partir de hidrógeno obtenido mediante energía solar. MAS XXI. UASC, Cuba.

$$\text{Flujo de H}_2 \text{ (g)} : 0.567 \frac{\text{Kg}}{\text{dia}} \cdot 11.12 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} = 6.3 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

Tabla 6.5: **Alimentaciones para la Producción de H<sub>2</sub> por Ruta Solar**

Insumos	GJ/Ton H <sub>2</sub>	k	R
Energía solar	968	1	1
Agua	0.0674	1	1
Energía eléctrica	0.387	2.58	0

Tabla 6.6: **Productos de la Generación de H<sub>2</sub> por Ruta Solar**

Productos	GJ/Ton H <sub>2</sub>	k <sup>52</sup>	R
Hidrógeno	117.7	8.16	1
Oxígeno	0.993	8.16	1

$$\eta_{eco} = \frac{1}{1 + \frac{\sum_i k_i E_{in, no-renovable}^i (1 - \eta_{ex, cadena})}{\sum_j E_{out}^j}} \quad (8)$$

$$\eta_{eco} = \frac{1}{1 + \frac{[k_{e.solar} E_{e.solar} (1 - R_{e.solar}) + k_{agua} E_{agua} (1 - R_{agua}) + k_{e.e} E_{e.e} (1 - R_{e.e})] \cdot (1 - \eta_{ex, cadena})}{\sum_j E_{out}^j}}$$

Al sustituir los datos de las Tablas 6.5 y 6.6 en la ecuación 8 desarrollada, se tiene:

<sup>52</sup> k = 1/ η<sub>ex, cadena</sub>

$$\eta_{eco} = \frac{1}{1 + \frac{[(0.387 \cdot 2.58) \cdot (1 - 0.1225)]}{(117.7 + 0.993)}} = \frac{1}{1 + \frac{(0.998) \cdot (1 - 0.1225)}{118.7}} = 0.9925$$

Tabla 6.7: Comparación de Eficiencias para la Obtención de Hidrógeno

<u>Ruta de producción</u>	$\eta_{ex, cadena}$ (%)	$\eta_{eco, cadena}$ (%)	$I_{no-renovable}$ [GJ/ton]
Combustibles Fósiles	69.7	69.7	770
Energía solar	12.25	99.25	0.87

## 6.7 Conclusiones

En la Tabla 6.7 se puede observar en términos exergéticos que la cantidad de energía útil aprovechada en los combustibles fósiles es mayor que en el caso de la ruta solar, pues hay muchas pérdidas de energía durante la recolección y canalización de la energía solar. Sin embargo, la *eficiencia exergética sustentable* del proceso de producción de hidrógeno se incrementa en la ruta que utiliza la fuente solar, pues la contribución energética al proceso en recursos renovables es mayor, que en la ruta fósil. Por ende, la irreversibilidad de la ruta fósil aumenta (viendo la irreversibilidad como una medida del agotamiento de los recursos naturales).

En base a los anteriores resultados, se infiere que *si* el proceso consistiera en la producción de energía eléctrica con hidrógeno utilizando únicamente energía solar como insumo para producción de hidrógeno en una primera etapa y en una segunda en donde se utilice la energía eléctrica producida como una recirculación para cubrir la demanda de energía de los sistemas auxiliares (compresor), *entonces* se tendría una *eficiencia exergética sustentable* del 100%, a diferencia del 99.25% para el caso analizado, donde se considera que la energía eléctrica suministrada para el compresor de hidrógeno se produce en una central termoeléctrica convencional, por que una parte de los insumos es no-renovable.

## 6.8 Bibliografía

1. Cornelissen R, Van der Berg, EcoChem, the new tool for process plants to calculate the sustainability based on the energy concept. Proceedings of ECOS. Copenhagen, Denmark. 2003
2. Sánchez R, Pérez J. Dispositivo productor de electricidad para una casa habitación a partir de hidrógeno obtenido mediante energía solar. MAS XXI. UASC, Cuba.
3. U.S. Department of Energy, *Hydrogen program plan: Hydrogen from natural gas and coal: the road to a sustainable energy future*, June 2003.
4. Hoffman P. “*Tomorrow’s Energy: Hydrogen, Fuel Cells, and the prospects for a clearer planet*”; MIT Press. USA. 2001
5. Rostrup J, Topsoe H. *Sustainable energy through chemical process technology. Proceedings of ECOS*. Copenhagen, Denmark. 2003
6. Bitir J, Tazerout M, *Taxes for CO<sub>2</sub> Emissions: An Approach for Small Scale CHP Development?*. Proceedings of ECOS. Copenhagen, Denmark. 2003
7. Hydrocarbon Processing; *Refining Processes 2002*. Nov 2002.
8. Kotas TJ, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, 2<sup>nd</sup> Edition, Krieger Publishing Company, USA. 1995.
9. Brundtland GH et al., *Our common future*, World Commission on Environment and Development, 1987.

## 7. Conclusiones Finales:

Se busca un sector energético mexicano que lleve a cabo el uso estratégico de sus recursos en las dimensiones de: *eficiencia térmica* de sus procesos, disponibilidad de combustibles e impactos ambientales generados.

Los indicadores presentados en el trabajo, son útiles en la cuantificación del impacto ambiental producido por la generación de gases contaminantes y uso de recursos renovables, dentro de la dicotomía energía-medio ambiente. La trascendencia de los indicadores estudiados se sostiene en su flexibilidad para poder evaluar simultáneamente los siguientes parámetros: 1) la renovabilidad de los combustibles empleados, 2) la generación de gases implicados en la generación del calentamiento global del planeta, 3) la normatividad ambiental en las emisiones de gases contaminantes, 4) el uso de recursos renovables, 5) el uso eficiente de energía, 5) el concepto de desarrollo sustentable y 6) los costos económicos asociados a los volúmenes de gases contaminantes emitidos.

En la siguiente tabla se presenta la totalidad de los indicadores de *eficiencia ecológica* calculados en este trabajo, mostrando los resultados obtenidos para cada indicador estudiado en diferentes tipos de combustibles usados para la producción de energía eléctrica.

### 7.1 Eficiencias Ecológicas para la Producción de Electricidad y Combustibles.

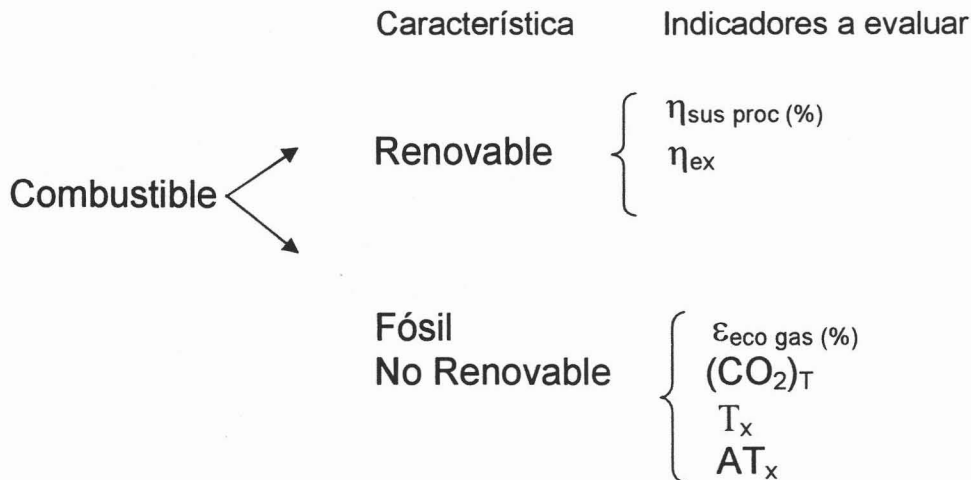
I <sub>EA</sub> / Combustible	GN.	Diesel	Carbón	Combustóleo	Comb. Ecol.	H <sub>2</sub> -Solar	H <sub>2</sub> -Fósil
$\eta_{\text{eco sus}}$ (%)	$\eta_{\text{ex}}$	$\eta_{\text{ex}}$	$\eta_{\text{ex}}$	$\eta_{\text{ex}}$	$\eta_{\text{ex}}$	99.25	69.7*
$\eta_{\text{eco gas}}$ (%)	91.36	85.45	88.34	87.09	89.44	100	100*
(CO <sub>2</sub> ) <sub>T</sub> [KgCO <sub>2</sub> / Kg <sub>F</sub> ]	5.15	6.78	2.46	5.08	4.17	0	0
T <sub>x</sub> (MMUSD/año)	156.7	11.6	122.5	496.3	407.4	0	0
AT <sub>x</sub> (USD/GWh)	5,131	4,941	5,758	3,752	3,080	0	0

\* Nota: La evaluación de la *eficiencia ecológica de emisiones gaseosas* ( $\eta_{\text{eco gas}}$ ) para el H<sub>2</sub> - Fósil, se realiza para la generación de energía eléctrica con este combustible (H<sub>2</sub>), no para su producción vía reformado catalítico, como se hace en el caso de la evaluación de la *eficiencia exérgica sustentable* ( $\eta_{\text{eco sus}}$ ).

En base a los resultados y términos de jerarquía el hidrógeno es el combustible más eficiente en términos de energía y medioambiente, y no tiene ningún costo asociado a sus emisiones. En el caso de los combustibles fósiles contemplados en este estudio encontramos que el gas natural es el combustible más eficiente en términos energético-ambientales, seguido por el combustóleo ecológico que se presenta como una excelente alternativa si se observa que se tiene el mejor costo asociado de emisiones para este combustible (AT<sub>x</sub>), y que su *eficiencia ecológica de emisiones gaseosas* ( $\varepsilon_{\text{eco gas}}$ ) es muy cercana al gas natural, por lo que se puede considerar como la mejor opción dentro de los combustibles fósiles, ya que además puede obtenerse a partir de crudo mexicano Maya.

Se prueba la hipótesis, los indicadores permiten evaluar cualquier tipo de combustible secundario, a fin de establecer su posición energético-ambiental o económica-ambiental con respecto a otros combustibles, e inclusive hacer una valoración del impacto que se tiene cuando se consideran variaciones al proceso mediante el cual se obtienen o consumen, si se hacen mejoras en su composición, o si se implementan tecnologías para mitigar los volúmenes de sus emisiones gaseosas contaminantes. Así mismo, se puede establecer una metodología de evaluación de combustibles alternativos:

Rutas para la evaluación de la *eficiencia ecológica* de un nuevo combustible:



Paralelamente, este trabajo fortalece una alternativa de generación de energía mediante el uso de un *combustóleo ecológico*, planteando un esquema para la generación de electricidad propia con residuales de *crudo mexicano maya* con bajo impacto ambiental como alternativa al planteamiento de un consumo intensivo de gas natural para la producción de energía eléctrica. La *propuesta* es una opción técnica en el aprovechamiento de los recursos del país, conservando nuestra autonomía en combustibles para la generación de electricidad, sin vernos en la necesidad de importar gas natural de Estados Unidos, Bolivia o el Perú.

Finalmente, se sugiere el estudio a fondo de la introducción del combustóleo ecológico a la canasta de combustibles para la generación nacional de electricidad, analizando su factibilidad técnica, viabilidad económica, pertinencia política, plausibilidad legislativa y trascendencia en términos de desarrollo nacional; todo esto desarrollado en un proyecto integral para su puesta en marcha.



---

## Anexos

*Síntesis del Artículo publicado en las memorias del 23 congreso de la IAEE North American Conference, llevado entre el 19-21 de Octubre de 2003, en la Ciudad de México<sup>53</sup>.*

### **ANÁLISIS DEL IMPACTO QUE TENDRÍA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN TERMOELÉCTRICAS ALIMENTADAS CON COMBUSTIBLE ECOLÓGICO EN MÉXICO.**

#### **Resumen**

Se plantea una propuesta para la generación de energía eléctrica en base a combustóleo, considerando que las tendencias en materia de consumo de energía eléctrica indican que es necesaria una revisión de las alternativas disponibles que aseguren energía eléctrica suficiente para el país en los próximos años. La utilización de combustóleo ecológico en plantas termoeléctricas se visualiza como una alternativa de generación necesaria y viable, dado que el procesamiento de fracciones cada vez más pesadas de crudo se está convirtiendo en una práctica común en el Sistema Nacional de Refinerías. Se comparan los costos necesarios para cubrir la demanda de energía eléctrica para el año 2011 usando este tipo de generación, contra los costos que tendría la generación en plantas de ciclo combinado alimentadas con gas natural.

#### **1. Generación de energía eléctrica**

Las proyecciones a futuro en materia de consumo de energía eléctrica, indican que es necesaria una revisión de las alternativas tecnológicas disponibles, para que, en base a una inversión programada se instale la infraestructura apropiada para hacer frente a la demanda energética que se avecina en los próximos años y que seguirá incrementándose a medida que el país se desarrolle.

#### **2. Combustóleo o Gas Natural: La disyuntiva.**

Debido al incremento en el costo de la energía eléctrica, la problemática ambiental y el desarrollo tecnológico de los equipos para la generación de la energía eléctrica y térmica ahora se utilizan con gran ventaja las plantas de cogeneración como una herramienta rentable. Las tecnologías de cogeneración en turbinas de vapor, con turbinas de gas o con ciclo combinado, proporcionan un alto rendimiento para los combustibles y representan una alternativa tecnológica para su implantación en las plantas termoeléctricas, implicando una reducción por pérdidas en el calor de proceso por quema de combustible.

Actualmente se maneja al gas natural como la mejor alternativa para estas plantas de cogeneración. El gas natural fue el combustible que tuvo mayor incremento en su consumo en el año 2000 y es el combustible que presenta mayores expectativas de consumo a nivel mundial para las siguientes décadas. Ocupa actualmente el 22 % del mercado mundial de combustibles y tiene la tercera posición después del petróleo y el carbón. A mediano plazo desplazará al carbón del segundo sitio. Tiene las ventajas de que su combustión genera menor cantidad de gases contaminantes que las gasolinas o el Diesel. PEMEX ha puesto en marcha su "Programa Estratégico de Gas" que consiste en varios proyectos de inversión en producción gasera, y que llevarán la producción de 5 mil millones de pies cúbicos al día hasta entre 7 mil 500 y 8 mil millones de pies cúbicos diarios hacia el 2008.

---

<sup>53</sup> Autores: Bazán Perkins Víctor S. & Cruz Gómez M. Javier. UNAM, Facultad de Química. 2003

El combustóleo como petrolífero tiene gran importancia por su consumo en plantas termoeléctricas, sin embargo, el endurecimiento de las normas ambientales, los precios con respecto al gas natural y la reducción en la producción del Sistema Nacional de Refinerías (SNR) de este petrolífero, han cedido paso a la sustitución de este combustible por gas natural, ya que tal conversión del uso de combustóleo a gas natural en centrales de cogeneración con ciclo combinado aumentaría la demanda de gas a una tasa anual aproximada del 16%, dejando de lado al combustóleo<sup>(1)</sup>.

En México las plantas termoeléctricas son una pieza clave en la generación de energía eléctrica, pues la combustión de hidrocarburos (combustóleo, gas, o diesel) en estas plantas ocupa el 64.8 % de la capacidad de generación nacional y el 72.05% de la producción total de la energía eléctrica.

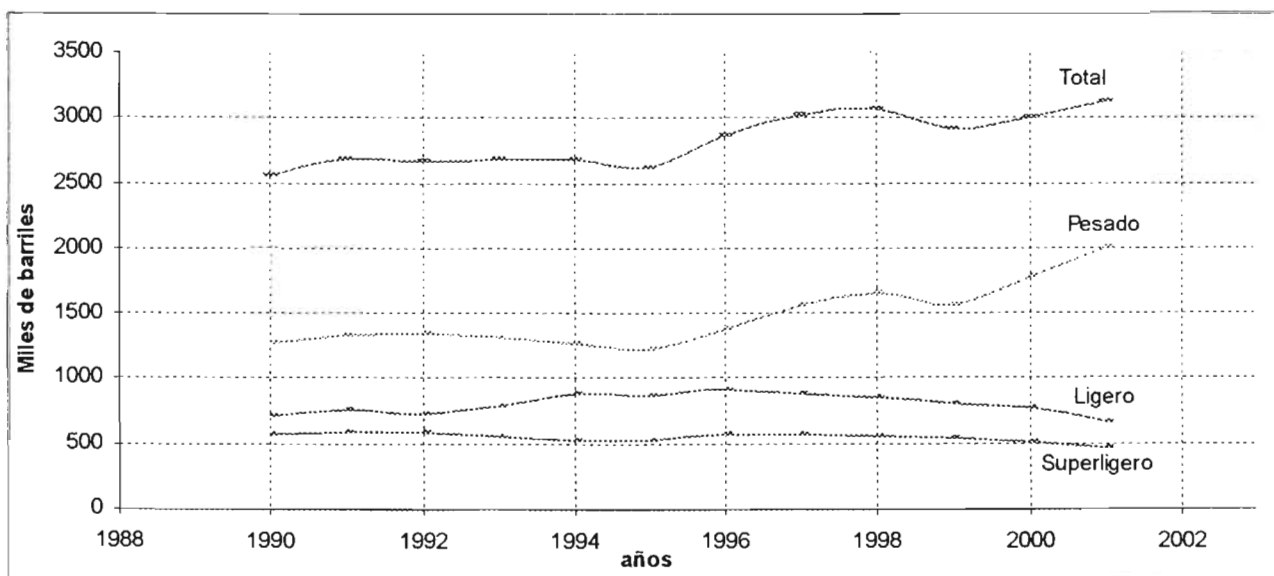
La disyuntiva ante la elevada demanda de energía eléctrica radica en si la alimentación de las plantas termoeléctricas será principalmente de gas natural o de combustóleo.

### 3. Un crudo cada vez más pesado

La Industria de Refinación a nivel mundial tiende al procesamiento de crudo pesado (tabla 1), orillando a las refinerías a modificar sus procesos actuales e instalar la infraestructura necesaria para el procesamiento de cargas más pesadas. En la última década la capacidad procesamiento para conversión crudo pesado a nivel mundial ha doblado en valor.

La producción de crudo en México en los próximos años será predominantemente de crudo pesado, en respuesta a esta tendencia el SNR ha incrementado su capacidad de procesamiento de fondos de barril, el proyecto para la reconfiguración de refinerías que actualmente realiza PEMEX tiene (entre otros) el objetivo de incrementar la capacidad de procesamiento de crudos pesados, producir gasolinas más limpias y reducir la producción de combustóleo y residuales

Producción de Petróleo Crudo Por Tipo en México



Fuente: PEMEX Refinación, anuario 2001

Tabla 1: Composición de Crudos que se Procesan en México

Crudo	° API	Azufre (% w/w)	Tipo
Maya	22	3.3	Pesado
Istmo	33.6	1.4	Ligero
Olmeca	39.3	0.8	Superligero

Fuente: SENER. (2002) *Prospectiva de Petrolíferos 2002-2011*,

El SNR cuenta con una capacidad de reducción de viscosidad de 258000 BPD y 534000 BPD de desintegración catalítica y térmica que representan el 17% de su capacidad de refinación, sólo en las refinerías de Salina Cruz, Cadereyta y Tula se tienen unidades reductoras de viscosidad y sólo en Salamanca y Tula se dispone de un proceso de hidrodesintegración de residuales (Salamanca H-Oil de 25,000 BPD y Tula HDR de 50,000 BPD).

El no refinar fondos de barril con las tecnologías apropiadas trae una serie de factores negativos en la producción de petrolíferos, tales como:

- I. *Bajo rendimiento en la elaboración de gasolinas y gasóleos.*
- II. *Incremento de asfaltos y combustóleo.*
- III. *Más contaminantes tóxicos en las emisiones a la atmósfera.*

#### 4. El combustóleo ecológico como alternativa

La demanda de combustóleo para generación de electricidad ha sido relativa al precio del gas natural, así mismo se proyecta una tendencia a la baja en el uso de combustóleo, a medida que éste sea sustituido por gas natural en plantas de generación de ciclo combinado, debido principalmente a cuestiones ambientales y de disponibilidad, ya que se sustituirá el combustóleo por gas natural en plantas termoeléctricas existentes y en plantas con nuevas tecnologías.

Tabla 2: Crudo al SNR y combustóleo producido en el año 2001

Refinería	Crudo BPD	Combustóleo BPD
Cadereyta	200,000	65,700
Madero	106,000	32,500
Minatitlán	177,000	69,600
Salamanca	186,000	54,600
Salina Cruz	293,000	115,400
Tula	290,000	92,100
Total	1252,000	429,900

Fuente: PEMEX Refinación, *Anuario 2001*

Las tendencias indican que la mezcla de petróleo será cada vez más pesada y sin embargo se proyecta y se desea que la producción combustóleo será cada vez menor (pasando de 430000 BPD a 226000 BPD al término del Proyecto de Reconfiguración de Refinerías de PEMEX).

Es pertinente considerar a las tecnologías de aprovechamiento de fondos de barril, puesto que los petrolíferos generados con estos procesos contienen niveles mínimos de azufre (0.45 a 1% w/w), nitrógeno y metales, además su carga puede ser de asfaltos y residuos de vacío con contenidos altos de azufre, nitrógeno y metales.

En cualquier lugar del mundo donde se procesen fondos de barril será necesario tener un proceso de Hidrodesintegración Catalítica de Residuales. Las tecnologías H-Oil o LC-Fining han sido ampliamente aceptadas en países como Japón, EUA, Canadá, Kuwait, Polonia, Italia y México (Salamanca y Tula).

En el caso de la tecnología H-Oil la revista Hydrocarbon Process reporta que de 1963 a 1996 se construyeron 6 plantas, para 1998 ya se tenían tres unidades más y una se encontraba en construcción. La demanda de esta tecnología es proporcional al procesamiento de fondos de barril a nivel mundial y es ampliamente aceptada por su flexibilidad de operación y conversión.

El panorama en materia energética en los próximos años requiere la búsqueda de las mejores alternativas de desarrollo en el sector eléctrico. El aprovechar los crudos pesados para generar electricidad tendrá un impacto económico favorable utilizando los combustibles residuales de las plantas de hidrodesintegración catalítica en plantas termoeléctricas, produciendo cantidades mínimas de gases contaminantes (NOx y SOx) durante su combustión. El uso de estas tecnologías es una alternativa a la inversión en nuevas plantas que usan gas natural en función de su precio o con fines ecológicos.

A los procesos de hidrodesintegración catalítica H-Oil o HDR siempre se les puede sumar la inclusión de procesos de coquización, desasfaltado y reducción de viscosidad para aprovechar mejor el crudo Maya en el Sistema Nacional de Refinerías.

Tabla 3: Características de procesos de lecho móvil<sup>(2)</sup>

Características	H-Oil	LC-Fining	
Temperatura, °C	410-450	385-450	
Presión H <sub>2</sub> , kg/cm <sup>2</sup>	70-175	70-189	
Conversión, %	55-80	55-80	
HDS	65-90	60-90	
HDM	60-80	50-98	
HDCCR	40-50	35-80	
<b>Carga:</b>	<b>Residuos de Vacío</b>		
°API	7.4	4.73	
Azufre, %p	4.85	4.97	
(Ni+V), ppm	295	181	
<b>Productos, %peso</b>			
C <sub>1</sub> -C <sub>4</sub>	3.5	C <sub>4</sub> -	2.35
C <sub>4</sub> -204°C	17.6	C <sub>5</sub> -177°C	12.60
204-371°C	22.1	177-371°C	30.62
371-565°C	34.0	371-550°C	21.46
C <sub>4</sub> >	95.4	550°C <sup>+</sup>	40.00
Consumo de H <sub>2</sub> , pie <sup>3</sup> /b	1410	1350	

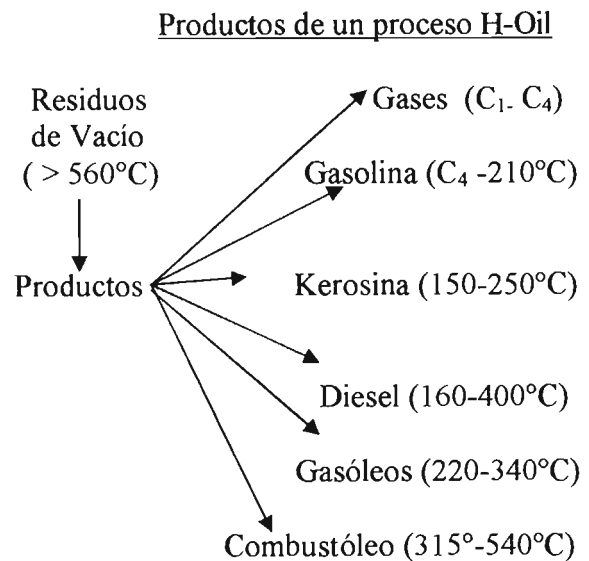


Tabla 4. Composición típica de productos del proceso H-Oil<sup>(3)</sup>

componente	(% w/w)	% (v/v)	densidad (ρr)	S (% w/w)
C <sub>1</sub> -C <sub>4</sub>	3.5	-	-	-
C <sub>5</sub> - 180 °C	6.3	8.7	0.726	< 0.01
180 - 370 °C	25.5	29.8	0.864	0.05
370 - 538 °C	33.9	36.3	0.942	0.21
< 538 °C	28.8	28.9	1.006	0.91
C <sub>4</sub> >	95.4	105.3	0.914	0.36

## 5. Impacto que tendría el uso combustóleo ecológico en la generación bruta de energía

La Secretaria de Energía en la “Prospectiva del Sector Eléctrico 2002-2011” realiza un pronóstico de consumo de electricidad en los siguientes tres escenarios económicos:

Tabla 5: Variaciones anuales en las variables económicas 2002-2011.

Variable / Escenario	Planeación	Alto	Moderado
Crecimiento PIB	4.5%	5.6%	3.4%
Variación de precio de combustóleo	-0.2%	-0.3%	0.5%
Variación de precio del gas natural	0.6%	0.5%	1.4%
Consumo al año 2011 del sector*	291.5 TWh	313.1 TWh	266.7 TWh

Tomando como punto de partida las proyecciones de SENER para el consumo de energía eléctrica en el año 2011 (tabla 7), evaluaremos el impacto que tendría el abastecer esta demanda de energía eléctrica con plantas termoeléctricas alimentadas con combustóleo ecológico generado en el Sistema Nacional de Refinación mediante plantas de hidrodesintegración catalítica (H-Oil), para el escenario de planeación.

Tabla 6: Cambio en el consumo de energía al 2011

(TWh)	Planeación	Alto	Moderado
2002	163	163	163
2011	291	313	266
Δ (%)	128 (78)	150 (92)	103

Tabla 7: Capacidad a instalar para el año 2011\*

(MW)	Termoeléctricas	Ciclo combinado
2002	41095	41095
2011	60637	59415
Δ (%)	19542 (47)	18,320 (44)

En una planta termoeléctrica convencional sólo el 38% de la energía contenida en el combustible, se convierte en energía eléctrica, perdiéndose el resto a través de: los gases de chimenea, de pérdidas mecánicas, a través del condensador o por pérdidas eléctricas por transmisión y distribución, etc.

La Central Termoeléctrica de Tula de 1500MW de capacidad será utilizada como modelo de referencia para la estimación del número de plantas a instalar en el año 2011.

Tabla 8: Centrales Eléctricas hacia el año 2011.

(1500MW)	Planeación	Ciclo combinado
Plantas	13	13

Tabla 9: Volumen de Combustóleo adicional al 2011

Volumen	Combustóleo H-Oil a Centrales
MMB/año	202
MMB/año* Planta.	15
BPD/Planta	42,740

Para producir 42,740 BPD de combustóleo ecológico se requiere de 13 Unidades H-Oil de 50,000 BPD de capacidad similar a la Unidad de Hidrodesintegración de Residuales de la refinera de Tula, Hgo. y para el caso de plantas de generación de ciclo combinado usando gas natural, se tienen los siguientes volúmenes de combustible requerido:

Tabla 10: Gas Natural Adicional a Ciclos Combinados al 2011.

Volumen / Escenario	Ciclo Combinado
MMft <sup>3</sup> /día	2,650
MMft <sup>3</sup> /año* Planta	74,404

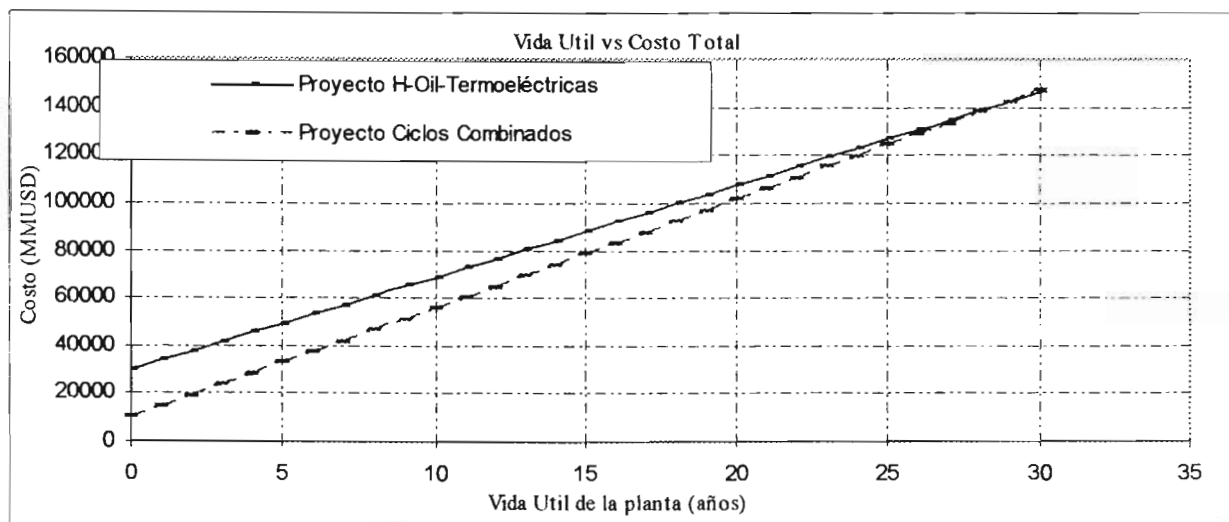
La siguiente tabla describe los costos de inversión para construir 13 plantas Termoeléctricas de 1500MW de capacidad y 13 unidades de Hidrodesintegración Catalítica de Residuales H-Oil de 50,000BPD cada una, también se incluye el costo de inversión en 13 plantas de Ciclo Combinado que usen gas natural de 1500MW de capacidad, así mismo se incluyen los costos anuales por operación y mantenimiento.

Tabla 11: Costo de los proyectos en millones de dólares (MMUSD).

Costos / Proyecto	Termoeléctricas	Ciclos Combinados
<b>Infraestructura</b>	Planeación	Planeación
Plantas Termoeléctricas	19500	9750
H-Oil	10400	
<b>Costos Anuales</b>		
Operación y Mto /año	683.84	601.07
Combustible / año	3191.8	3971.5

Se observa que ambos proyectos son equivalentes ya que sus costos totales de operación son iguales, al término de su vida útil (30 años).

Costo Total de los Proyectos de Generación en Escenario de Planeación



## 6. Conclusiones:

La política energética a seguir en México debe contemplar los siguientes aspectos:

**I. Una inversión continua en infraestructura de generación eléctrica.** Aunque el sector eléctrico del país satisface la demanda interna de energía, ésta se duplicará en los próximos 12 años.

**II. Se requiere explorar nuevos campos y fuentes alternativas.** Las reservas nacionales de petróleo tienden a bajar. La exportación y precio del petróleo son un factor decisivo para equilibrar el presupuesto federal y el precio de venta de la mezcla mexicana es muy oscilante, prácticamente el 60% de la producción total de petróleo crudo proviene de la región Marina Noreste del país (Cantarell), y este crudo es pesado. El SNR se verá forzado al procesamiento de crudos pesados.

**III. Aprovechamiento de la infraestructura disponible.** El SNR incrementará su alimentación de crudos pesados por ello se requiere la optimización de la infraestructura disponible y el desarrollo e implementación de tecnologías de punta para un adecuado procesamiento de la cargas. La CFE debe vincularse estrechamente con PEMEX a fin de aprovechar su infraestructura para aprovechar al máximo los recursos energéticos generados nacionalmente.

**IV. Inversiones en infraestructura de generación eléctrica diversificada:** La utilización de un solo energético no es sana debido a la volatilidad de los Precios del Gas Natural y del Petróleo; un desbaste o alza significativa en los precios de los energéticos implicarían altos costos en la producción de energía eléctrica.

#### **PROPUESTA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA CON CRUDO NACIONAL:**

1. PEMEX Refinación puede generar la producción del “combustóleo ecológico” (a partir de Crudo Maya), 2) Comisión Federal de Electricidad utilizará estos combustibles para la generación de energía eléctrica en plantas termoeléctricas convencionales.

2. No habrá necesidad de hacer reformas a las actuales leyes Mexicanas en materia de generación de energía eléctrica.

3. Para poder sincronizar a ambas empresas se podrá generar otra paraestatal enfocada a la coordinación de este y otros proyectos que busquen obtener energía eléctrica a partir del procesamiento eficiente de crudos pesados con tecnología de punta, compradas o desarrolladas principalmente por México, esta nueva paraestatal podría depender de la Secretaría de Energía.

4. El financiamiento para este proyecto puede hacerse paulatinamente. Así podremos aprovechar nuestros recursos, con autosuficiencia en la producción de energía secundaria (electricidad y petrolíferos), buscando reducir la exportación masiva de petróleo e inclusive se podría vender energía eléctrica a California, EUA. El monto de inversión para satisfacer la demanda de energía eléctrica al 2011 es de aproximadamente 30,000 millones de dólares (30,000 MMUSD), anualmente se invierten alrededor de 5,000 MMUSD en el sector eléctrico y en el año 2003 se invertirán alrededor de 14,300 MMUSD en PEMEX<sup>54</sup>.

5. Esta propuesta, busca satisfacer la demanda de electricidad al año 2011, con una inversión cercana a los 30,000 MMUSD en contraste a los 59,000 MMUSD que se plantean oficialmente para resolver el problema energético del país<sup>55</sup> tan sólo para el sector eléctrico hacia el 2009. Pues se contemplan inversiones adicionales de 19,000 MMUSD en refinación y 21,000 en la producción y distribución de gas natural.

6. México no puede desarrollarse usando gas natural como única opción, además de ser una ruta extremadamente riesgosa por la alta volatilidad de su precio, requiere una costosa inversión. Adicionalmente se tendrá que recurrir a su importación, pues las reservas nacionales no serán suficientes para cubrir la demanda programada. El procesamiento sustentable y eficiente de los crudos pesados puede ser la opción tecnológica que debemos tener para explotar nuestro abanico recursos energéticos, la propuesta aquí presentada indica que es preciso el hacer una inversión inteligente a futuro en la infraestructura de refinación y generación de energía del país, haciendo un equilibrio de sus fuentes de energía.

<sup>54</sup> Enciso A., La Jornada (2003). Necesaria la participación de la IP en electricidad: Fox. Política 28/5/2003. p 3.

<sup>55</sup> Fuente: AIE-Secretaría de Energía (2002). World Energy Outlook. Prospectiva de Energía de México. OCDE/AIE 2002.

## 7. Bibliografía:

1. Fabio Barbosa. (2000). PEMEX: Histórico proyecto de producción gasera, Petróleo y Electricidad., No 51, Mayo, pp. 3-7.
2. James J. Coylar, Lawrence I. Wisdom (1997), The H-Oil Process: A Worldwide Leader in Vacuum residue Hydroprocessing, National Petroleum Refiners Asosociación, 1997 NPRA Annual Meeting. San Antonio, Texas. USA.
3. Castañeda L. Alonso M, Ancheyta J, Centeno N, del Río S. (1998). Tendencias Tecnológicas en el Hidroprocesamiento de Crudo y Fracciones Pesadas, Instituto Mexicano del Petróleo, Pemex-Refinación. Memorias de la XXXIX Convención Anual, México León, Gto 1999.
4. González Fernández R, Villalobos Hierriart A. (1998). Procesamiento de crudos pesados en México, Instituto Mexicano del Petróleo, Memorias de la XXXIX Convención Anual, México León, Gto 1999
5. Hydrocarbon Process, (1996), Annual Refining Report. 75(11), 126
6. PEMEX Refinación. Anuario General 2001.
7. PEMEX. Anuario de Labores 2001.
8. PEMEX Refinación. Memoria de Refinación. 2001
9. Comisión Federal de Electricidad, (2002). Reporte Anual 2001.  
[www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx)
10. Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. Tecnologías de Cogeneración.  
[www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx)
11. Secretaria de Energía. (2001). Visión general del Gas Natural en México Sep-2001.  
[www.sener.gob.mx](http://www.sener.gob.mx)
12. Secretaria de Energía. (2002) Prospectiva de Petrolíferos 2002-2011  
[www.sener.gob.mx](http://www.sener.gob.mx)
13. Secretaria de Energía. Prospectiva de Petrolíferos 2002-2011  
[www.sener.gob.mx](http://www.sener.gob.mx)
14. Energy Information Administration. (2002). An Energy Overview of México. U.S Department of Energy. [www.eia.doe.gov](http://www.eia.doe.gov)



## TABLAS

### A1. Prefijos de Múltiplos de Unidades

$10^{24}$	yotta	Y
$10^{21}$	zetta	Z
$10^{18}$	exa	E
$10^{15}$	peta	P
$10^{12}$	tera	T
$10^9$	giga	G
$10^6$	mega	M
$10^3$	kilo	k
$10^2$	hecto	h
$10^1$	deca	da
$10^{-1}$	deci	d
$10^{-2}$	centi	c
$10^{-3}$	mili	m
$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^{-9}$	nano	n
$10^{-12}$	pico	p
$10^{-15}$	femto	f
$10^{-18}$	atto	a
$10^{-21}$	zepto	z
$10^{-24}$	yocto	y

## COMBUSTIBLES

### A2a: Poder Calorífico Inferior (PCI) para Distintos Gases y Combustibles <sup>34</sup>

Gas Combustibles	PCI MJ/m <sup>3</sup>
CO (monóxido de carbono)	12
H <sub>2</sub> (hidrógeno)	10.78
H <sub>2</sub> S (ácido sulfhídrico)	22
Gas Natural (No asociado)	37.5
CH <sub>4</sub> (metano)	35.8
Gas Natural (asociado)	40
Biogas (CH <sub>4</sub> & CO <sub>2</sub> )	21.6
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (etileno)	56
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (etano)	63.7
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (propileno)	81
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (propano)	93
nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (n-butano)	118.5
GLP	23484

**A2b: Poder Calorífico Inferior (PCI) para Distintos Gases y Combustibles** <sup>56</sup>

Combustible	MJ/Kg
Azufre	8.75
Hidrógeno	120
Basura doméstica	9.4
Gas natural	52
GLP	48
Butano	49
Nafta	45
Propano	50
Metano	50
Gasolina	47
Biodiesel	40.7
Diesel	48
Gasóleo	42
Combustóleo pesado	42
Combustóleo ligero	43
Petróleo diáfano	46
Crudo Maya	39
Crudo Istmo	38
Crudo Olmeca	37
Carbón térmico (MICARE)	19
Carbón siderúrgico	23
Coque de petróleo	31
Uranio Enriquecido (PCS)	4012 MJ/g

**A3: Consumo de Combustibles Fósiles para la Generación de Electricidad**

Año	Generación (GW-h)	Consumo de combustibles CFE			
		Combustóleo (x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /año)	Gas natural (x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /año)	Diesel (x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /año)	Carbón (x 10 <sup>3</sup> t./año)
1995	100 685.9	16 752	5 226	269	7 554
1996	106 833.1	17 121	5 402	244	8 984
1997	119 017.0	19 808	5 902	342	8 852
1998	131 376.4	21 680	6 990	500	9 345
1999	132 517.4	21 287	7 757	454	9 468
2000	143 865.4	22 896	9 512	660	9 566
2001	152 818.0	22 109	11 328	457	11 071

Fuentes: CFE, Reporte Anual 2001 82002), Secretaria de Energía. Prospectiva de Petrolíferos 2002-2001. (2002)

<sup>56</sup> Fuentes: Elaboración propia en base a datos tomados de: 1) NOM-012-ENER-1996, 2) Revised 1996 IPCC, Guidelines for National Gas Inventories: Workbook. P.1.6, 3) NOM-085-ECOL-1994, 4) PEMEX, 1995. 5) Jiménez B. 2001. p.679, 690. 6) Winpower, ([www.windpower.org/css/ps.htm](http://www.windpower.org/css/ps.htm)), 7) NOM-CCAT-019-ECOL/1993

#### A4: Factores de Planta y Eficiencia Térmica por Tecnología de Generación

Central	Potencia (MW)	Eficiencia Bruta (%)	Vida útil (años)	Factor de planta típico	Usos propios (%)	
Térmica convencional	2 X 350	37.56	30	0.750	5.8	
	2 X 160	36.31	30	0.650	6.2	
	2 X 84	32.42	30	0.650	6.4	
	2 X 37.5	30.63	30	0.650	8.3	
Turbogas						
Aeroderivada gas	1 X 43.7	37.26	30	0.125	2.5	
Aeroderivada diesel	1 X 43.2	38.07	30	0.125	1.6	
Industrial gas	1 X 85	29.83	30	0.125	1.2	
Industrial gas "F"	1 X 184	33.54	30	0.125	2.0	
Industrial gas "G"	1 X 250	35.18	30	0.125	2.2	
Ciclo combinado gas	1 X 279	51.04	30	0.8	3.1	
	1 X 560	51.14	30	0.8	3.1	
	1 X 737	51.72	30	0.8	3.2	
Diesel	2 X 18.7	47.61	30	0.65	5.1	
	3 X 13.5	47.35	30	0.65	5.7	
	3 X 3.4	43.53	30	0.65	7.1	
Carboeléctrica	2 X 350	37.24	30	0.75	7.3	
	Dual s/desulfurador	2 X 350	37.39	30	0.75	7.3
	Dual c/ desulfurador	2 X 350	37.39	30	0.75	11.4
Nuclear (ABWR)	1 X 1356	34.54	30	0.85	3.1	

Fuente: Secretaría de Energía. *Prospectiva del Sector Eléctrico*. 2002

#### A5: Propiedades de Algunos Combustibles Fósiles.

Combustible	Poder Calorífico Inferior	Densidad Relativa al Agua	Eficiencia térmica Central
Nombre/ unidades	(MJ/Kg)	(g/mL)	$\eta$ (%)
Gas Natural <sup>1</sup>	62.94	0.0005096	51.15 (CC)
Carbón	23.235	0.9	37.39 (CE)
Combustóleo	40.93	0.982	37 (D)
Diesel	45.21	0.837	38 (MD)

Fuente: Elaborado con base en datos de Balance Nacional de Energía 2002, y CFE.

Densidad relativa a el aire ( $\rho = 1 \text{ g/L}$ )

CC: Ciclo Combinad

D: Diesel

1: Densidad del gas natural = 0.596 g/L

TC: Térmica Convencional

CE: Carboeléctrica

#### A6: Comparación de Propiedades entre Biodieseles y el Diesel Convencional

Propiedad	RME	REE	RME	Aceite Diesel
Calor de Combustión(BTU/Lb)	17506	17500	>17000	19652
Flash POINT (°F)	338	365	230	176
Punto de Niebla (°F)	26	30	-	7
Punto de Fluidéz	6	-5	-	-18
Viscosidad (Cs) <sup>o</sup> 104 °F	5.7	6.1	4	3.51
Densidad (Lb/gal) <sup>o</sup> 70 °F	7.20	7.31	7.5	7.07
% en peso de Azufre	0.001	0.008	0.01	0.36

Fuente: Phoenix Chemical Lab, inc. Chicago USA. 1997.

### A7: Características del Combustóleo.

Propiedad	Cantidad
Carbono (% peso)	85.18
Hidrógeno (% peso)	10.35
Nitrógeno (% peso)	0.29
Azufre (% peso)	3.70
Agua (% peso)	0.1
Ceniza (% peso)	0.063
Oxígeno (% peso)	0.31
Asfáltenos en n-pentano (% peso)	16.17
Carbón Conradson (% peso)	16.58
Viscosidad cinemática, a 50 °C, cSt	1300
Poder calorífico neto (kJ kg-1)	39.880
Temperatura de inflamación (°C)	102.0
Peso específico a 15/15 °C	1.002
Vanadio (ppm)	215.0
Sodio (ppm)	24
Níquel (ppm)	10
Fierro	7

Fuente: Ocampo Barrera René. *Combustión de emulsiones de agua en combustóleo y perspectivas de aplicación en México*. Artículos técnicos/ Boletín IIE, mayo-junio. 1998.

### A8: Propiedades del Hidrógeno

Densidad de gas (g/m <sup>3</sup> )	89.87
Densidad de líquido (g/L)	70.79
Punto de fusión (K)	14.02
Punto de ebullición (K)	20.26
Calor de vaporización (KJ/mol)	0.44936
Calor de fusión (KJ/mol)	0.05658
Temperatura de auto ignición (°C)	500
Límite inferior de inflamabilidad (%)	4
Límite superior de inflamabilidad	75

Fuentes: "FIRE Hazards Properties of Flammable Liquids, Gases and Volatile Solids", (NFPA). Standard 325 M. Quince Massachussets 1990.

### A9: Formulas Químicas

CFC Clorofluorocarbono  
C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> Hexafluoroetileno (CFC-116)  
CF<sub>4</sub> Tetrafluoruro de carbono (CFC-14)  
CH<sub>4</sub> Metano  
CO Monóxido de carbono  
CO<sub>2</sub> Bióxido de carbono  
HCFC Hidroclorofluorocarbono  
HFC Hidrofluorocarbono  
N<sub>2</sub>O Óxido nitroso  
Fuente: PEMEX, 1995.  
NO<sub>2</sub> Bióxido de nitrógeno  
NO<sub>x</sub> Óxidos de nitrógeno  
PFC Hidrocarburo perfluorado  
SF<sub>6</sub> Hexafluoruro de azufre  
SO<sub>2</sub> Bióxido de azufre  
SO<sub>x</sub> Óxidos de azufre

### A10: Composición del Gas Natural

Compuesto	(%) v/v
CH <sub>4</sub>	93.3
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.5
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.1
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.1
H <sub>2</sub> S	0
CO <sub>2</sub>	0

## AIRE

### A 11: Potenciales de Calentamiento Global (Tiempo de vida en años)

Potenciales de Calentamiento de Global (PCG) directos en relación con el bióxido de carbono (para gases cuyos periodos de vida han sido suficientemente caracterizados). Los PCG son un índice para calcular la contribución al calentamiento mundial relativo debido a la emisión en la atmósfera de un Kg. de un gas determinado de efecto invernadero, comparado con la emisión de un Kg. de bióxido de carbono. Los PCG calculados para diferentes horizontes temporales muestran los efectos de los periodos de vida en la atmósfera de los diferentes gases.

Gas	Formula	Periodo de vida	años		
			20 0	100	500
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>		1	1	1
Methane <sup>a</sup>	CH <sub>4</sub>	12.0 <sup>b</sup>	62	23	7
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	114 <sup>b</sup>	275	296	156
<b>Hydrofluorocarbons</b>					
HFC-23	CHF <sub>3</sub>	260	9400	12000	10000
HFC-32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	5.0	1800	550	170
HFC-41	CH <sub>3</sub> F	2.6	330	97	30
HFC-125	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	29	5900	3400	1100
HFC-134	CHF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	9.6	3200	1100	330
HFC-134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	13.8	3300	1300	400
HFC-143	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> F	3.4	1100	330	100
HFC-143a	CF <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	52	5500	4300	1600
HFC-152	CH <sub>2</sub> FCH <sub>2</sub> F	0.5	140	43	13
HFC-152a	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	1.4	410	120	37
HFC-161	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	0.3	40	12	4
HFC-227ea	CF <sub>3</sub> CHFCF <sub>3</sub>	33	5600	3500	1100
HFC-236cb	CH <sub>2</sub> FCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	13.2	3300	1300	390
HFC-236ea	CHF <sub>2</sub> CHFCF <sub>3</sub>	10	3600	1200	390
HFC-236fa	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	220	7500	9400	7100
HFC-245ca	CH <sub>2</sub> FCF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	5.9	2100	640	200
HFC-245fa	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	7.2	3000	950	300
HFC-365mfc	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	9.9	2600	890	280
HFC-43-10mee	CF <sub>3</sub> CHFCHFCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	15	3700	1500	470
<b>Fully fluorinated species</b>					
SF <sub>6</sub>		3200	15100	22200	32400
CF <sub>4</sub>		50000	3900	5700	8900
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>		10000	8000	11900	18000
C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>		2600	5900	8600	12400
C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>		2600	5900	8600	12400
c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>		3200	6800	10000	14500
C <sub>3</sub> F <sub>12</sub>		4100	6000	8900	13200
C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>		3200	6100	9000	13200
<b>Ethers and Halogenated Ethers</b>					
CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>		0.015	1	1	<<1
HFE-125	CF <sub>3</sub> OCHF <sub>2</sub>	150	12900	14900	9200
HFE-134	CHF <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub>	26.2	10500	6100	2000
HFE-143a	CH <sub>3</sub> OCF <sub>3</sub>	4.4	2500	750	230
HCFE-235da2	CF <sub>3</sub> CHClOCHF <sub>2</sub>	2.6	1100	340	110
HFE-245fa2	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub>	4.4	1900	570	180
HFE-254cb2	CHF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> OCH <sub>3</sub>	0.22	99	30	9
HFE-7100	C <sub>4</sub> F <sub>9</sub> OCH <sub>3</sub>	5.0	1300	390	120
HFE-7200	C <sub>4</sub> F <sub>9</sub> OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	0.77	190	55	17
H-Galden 1040x	CHF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> OC <sub>2</sub> F <sub>4</sub> OCHF <sub>2</sub>	6.3	5900	1800	560
HG-10	CHF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub>	12.1	7500	2700	850
HG-01	CHF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub>	6.2	4700	1500	450

<sup>a</sup> Los PCG del metano incluyen una contribución indirecta de la producción de H<sub>2</sub>O y O<sub>3</sub> estratosféricos.

<sup>b</sup> Los valores para el CH<sub>4</sub> y el N<sub>2</sub>O son tiempos de ajuste, que incorporan los efectos indirectos de la emisión de cada gas en su propio periodo de vida.

Fuente: IPCC, Cambio climático 2001: Informe de síntesis. Informe del Grupo de Trabajo I del IPCC. 2001

### A 12: Emisiones de CO<sub>2</sub> para Distintos Combustibles

Combustible	CO <sub>2</sub> Kg/GJ	CO <sub>2</sub> Kg/Kg combustible
Gasolina	73	3.2
Fracciones del petróleo	74	3.16
Fracciones pesadas del petróleo	78	3.15
Gas natural	57	2.74
Carbón térmico	95	2.33

Fuente: Danish Energy Agency, ([www.windpower.org/css/ps.htm](http://www.windpower.org/css/ps.htm))

### A 13: Propiedades del Hidrógeno, Metano y Propano

Propiedad	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
<b>PCI</b>			
KJ/Kg	119972	50020	46350
KWh/Kg	33.33	13.90	12.88
MJ/Nm <sup>3</sup>	10.783	35.882	93.215
KWh/Nm <sup>3</sup>	2.995	9.968	25.893
<b>PCS</b>			
KJ/Kg	141890	55530	50410
KWh/Kg	39.41	15.42	14.00
MJ/Nm <sup>3</sup>	12.745	39.819	101.242
KWh/m <sup>3</sup>	3.509	11.061	28.123
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0.08988	0.7175	2.011
Constante del Gas (J/KgK)	4124	518.8	188.5
Temperatura de ignición en aire (°C)	530	645	510
Límite de Ignición en Aire (%)	4.1-72.5	5.1-13.5	2.5-9.3
Máxima Velocidad de Flama cm/s	3.46	4.3	47

Fuente: Boletín N.1 de la Sociedad Mexicana de Hidrógeno.

### A14: Factores de Emisión de Acuerdo con IPCC (Kg/TJ)

Combustible/ Gas	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	NMVOC	N <sub>2</sub> O
Gas natural	56100	18	250	-	1	5	0.1
Combustóleo Ligero	77367	15	200	497.6	0.9	5	0.3
Combustóleo Pesado	77367	15	200	995.3	0.9	5	0.3
Diesel	74067	16	220	230.8	0.9	5	0.4
Carbón Bituminoso	94600	9	380	1045.2	0.7	5	1.6

Revised 1996 IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook. V 2 And Reference Manuel V 3.

### A15: Factores de Emisión de Acuerdo con EPA (AP-42) (Kg/TJ)

Combustible/ Gas	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	NMVOC	N <sub>2</sub> O
Gas natural	49716	34.8	116	0.2	1	-	0.9
Combustóleo Ligero	66539	14.9	140.2	936.9	0.8	-	0.3
Combustóleo Pesado	74595	14.9	140.2	936.9	0.8	-	0.3
Diesel	-	16.7	80	236.7	-	-	0.4
Carbón Bituminoso	145137	13.7	316.1	1045.2	1.1	-	0.8

Compilation of fair Pollution Emission Factors AP-42, 4th Edition Vol 1, Stationary Point and area Sources.

## A16: Factores de Emisión NOM-ECOL-085-1994.

TABLA 5.  
1° ENERO DE 1990 EN ADELANTE

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE COMBUSTION MJ/h	TIPO DE COMBUSTIBLE EMPLEADO	DENSIDAD DEL HUMO	PARTICULAS (PST) mg/m <sup>3</sup> ( kg/10 <sup>6</sup> kcal)			BIOXIDO DE AZUFRE ppm V ( kg/10 <sup>6</sup> kcal)			OXIDOS DE NITROGENO ppm V ( kg/10 <sup>6</sup> kcal)			EXCESO DE AIRE DE COMBUSTION % volumen (5)
		Número de mancha u capacidad	ZMCM	ZC (3)	RP	ZMCM	ZC (3)	RP	ZMCM	ZC (4)	RP	
Hasta 5,250	Combustibles o gasóleos	3	NA	NA	NA	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	NA	NA	NA	50
	Otros líquidos	2	NA	NA	NA	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	NA	NA	NA	
	Gaseosos	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
De 5,250 a 43,000	Líquidos	NA	75 (0.106)	350 (0.426)	450 (0.568)	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	150 (0.507)	150 (0.507)	375 (1.0)	40
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	150 (0.486)	150 (0.486)	375 (0.359)	
De 43,000 a 110,000	Líquidos	NA	60 (0.805)	300 (0.426)	400 (0.568)	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	110 (0.294)	110 (0.294)	375 (1.0)	30
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110 (0.281)	110 (0.281)	375 (0.359)	
Mayor de 110,000	Sólidos	NA	60 (0.090)	250 (0.375)	350 (0.525)	550 (2.16)	1,100 (4.31)	2,200 (8.16)	110 (0.309)	110 (0.309)	375 (1.052)	25
	Líquidos	NA	60 (0.085)	250 (0.355)	350 (0.491)	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	110 (0.294)	110 (0.294)	375 (1.0)	
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110 (0.281)	110 (0.281)	375 (0.359)	

Notas y significados de siglas en Anexo 1

## A17: Propiedades del Aire

Densidad 1.225 Kg/m<sup>3</sup>      R = 0.2871 KJ/ KgK  
M = 28.96 mol/mol          Cp = 15.0667 KJ/Kg  
ho = 15.067 KJ/Kg          so = 0.05336 KJ/KgK  
P = 1.01325 bar              T = 15°C

## A18: Correlaciones de Szargut y Styrylska para Cálculo de φ:

Para sustancias orgánicas secas contenidas en combustibles fósiles sólidos compuestos por: C,H,O y N

$$\varphi_{\text{seco}} = 1.0437 + 0.1882 \text{ H/C} + 0.0610 \text{ O/C} + 0.0404 \text{ N/C} \quad \text{Con una relación O/C} < 0.667 \text{ (\% w/w)}$$

$$\varphi_{\text{seco}} = \frac{1.0438 + 0.1882 \frac{\text{H}}{\text{C}} - 0.2509 \left( 1 + 0.7256 \frac{\text{H}}{\text{C}} \right) + 0.0383 \frac{\text{N}}{\text{C}}}{1 - 0.3035 \frac{\text{O}}{\text{C}}} \quad \text{Con una relación } 2.67 > \text{O/C} > 0.667$$

Szargut y Styrylska asumen que el cociente de exergía química ( $\epsilon^\circ$ ) y el Poder Calorífico Inferior (PCI) para combustibles industriales sólidos y líquidos es el mismo que para sustancias puras, tienen el mismo cociente de sus constituyentes químicos puros. Para incluir el efecto del azufre como sustancia pura (sin considerar sus enlaces químicos), se tiene la siguiente expresión, en donde también fue omitido el efecto de las cenizas.

Exergía química de un combustible industrial sólido:

$$\epsilon^\circ (\text{KJ/Kg}) = (\text{PCI (KJ/kg)} + 2442 w) \varphi_{\text{seco}} + 9417 s$$

Donde w y s son las fracciones en peso de ceniza y azufre.

Para combustibles líquidos el efecto del azufre fue incluido en la correlación

$$\varphi = 1.0401 + 0.1728 \text{ H/C} + 0.0432 \text{ O/C} + 0.2169 \text{ S/C} (1 - 2.0628 \text{ H/C})$$

## A19: Memorias de Cálculo

### -Obtención de Hidrógeno por el Proceso de Reformado Catalítico:

Vapor:

$$\begin{array}{l}
 12 \text{ bar, vap sat} \\
 (T=461.5\text{K}) \\
 \text{AER:} \\
 T_o = 298\text{k} \\
 P_o = 1.013 \text{ bar} \\
 h = 104.9 \text{ KJ/Kg} \\
 s = 0.3674 \text{ KJ/Kg K}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 h_g = 1196.5 \text{ BTU/lbm} \\
 = 2783 \text{ KJ/Kg} \\
 s_g = 1.5570 \text{ BTU/lb R} \\
 = 6.5188 \text{ KJ/Kg K}
 \end{array}
 \right.
 \begin{array}{l}
 b = (h-h_o)-T_o(s-s_o) \\
 b = (2783-104.9)-298(6.5188-0.3674) \\
 b = 845\text{KJ/Kg}
 \end{array}$$

### Balance de Exergía

Planta HDN (18500 BPD)	Flujo	Condiciones	E [MJ/vol, masa]	Ein [MJ/día]
<u>Recursos</u>				<b>105987700</b>
F				
Agua (Ton/d)	15000	20°F	7.5 MJ/Ton	112500
Energía eléctrica (MWh/d)	632	-	-	2275200
Carga Negra (BPD)	18500	63P/25N/12A	5600MJ/b	103600000
<u>Productos</u>				<b>88569383</b>
P				
Vapor (Ton/d)	528	12 bar, sat	<b>845 MJ/Ton</b>	446160
Hidrógeno (MCD)	555000	AER	10.58MJ/m3	5872233
GLP (BPD)	685	AER	3734 MJ/b	2557790
Reformado (BPD)	15700	MTBE	5076MJ/B	79693200
<u>Pérdidas + destrucción</u>				
I				
Combustible (BPD)	3110		5600	<b>17418316</b>

Fuente: Basada en datos de Hydrocarbon Processing. Nov 2002. p 123.

### -Sistema de generación de hidrógeno por la ruta solar

Potencia de radiación solar en Ciudad de México = 2844 KJ/ m<sup>2</sup>\*día

E= Energía anual producida = 3000 KWh/año

### -Eficiencia exergética de un sistema de generación de energía eléctrica con H<sub>2</sub> producido por una fuente Solar

$\eta_{ex} = \eta_{c. \text{ solar}} \cdot \eta_{reg. \text{ Voltaje}} \cdot \eta_{c. \text{ electrolítica}} \cdot \eta_{compresión} \cdot \eta_{almacenamiento} \cdot \eta_{c. \text{ combustión}} \cdot \eta_{convertidor \text{ DC/AC}}$

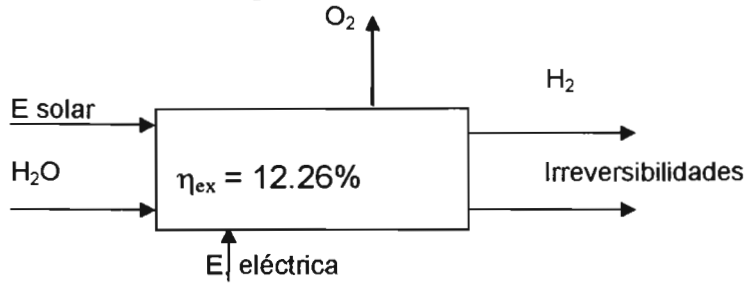
$\eta_{ex} = 0.15 \cdot 0.95 \cdot 0.88 \cdot 0.8 \cdot 0.95 \cdot 0.65 \cdot 0.91 = 5.63 \%$

Cálculo de Área del arreglo de las celdas solares:

$$A = \frac{E}{R \cdot \eta} = \frac{3000 \text{ KWh/año}}{1795 \text{ KWh/año} \cdot \text{m}^2 \cdot 0.0563} \approx 31 \text{m}^2$$



## -Eficiencia exergetica de un sistema de generaci3n de hidr3geno con ruta Solar



$$\text{AER: } b_o(\text{O}_2) = \mu_o - \mu_{oo} = -14611 - (-15554) = 943 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} = 124.15 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$\text{AER: } b_o(\text{H}_2) = \mu_o - \mu_{oo} = -9301 - (-65533) = 56232 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} = 117716 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$B_{\text{SOLAR}} = 1795 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a} \cdot 31 \text{ m}^2 = 55645 \text{ KWh/a} = 548827.4 \text{ KJ/dia}$$

$$B_{\text{compresor}} = 22.25 \text{ KWh/a} = 219.5 \text{ KJ/dia}$$

$$B_{\text{agua}} = 0.004187 \text{ KJ/Kg}$$

Compuesto	Flujo M3sico/celda (Kg/h)
H <sub>2</sub>	0.004725
O <sub>2</sub>	0.0378
H <sub>2</sub> O	0.04252

Compuesto	Flujo M3sico/celda (Kg/dia)
H <sub>2</sub>	0.567
O <sub>2</sub>	4.536
H <sub>2</sub> O	5.1

Para 15 celdas, expuestas 8h d3a

$$\eta_{ex} = \frac{117716 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \cdot 0.567 \frac{\text{Kg}}{\text{dia}} + 4.536 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \cdot 124.15 \frac{\text{Kg}}{\text{dia}}}{219.5 \frac{\text{KJ}}{\text{dia}} + 548827.4 \frac{\text{KJ}}{\text{dia}} + 5.1 \frac{\text{Kg}}{\text{dia}} \cdot 0.004187 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}} = 0.1226$$

## -Memoria de c3lculo para consumo de combustibles en 2001:

De las tablas 4.1 a 4.4 y los datos de anexo A5, tenemos:

$$\text{Combust3leo: } (22109.3 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{a} \cdot 0.982 \text{ Ton/m}^3) = 21711358 \text{ Ton/a} \cdot \text{a} \cdot \text{a}$$

$$\text{Gas Natural: } (11328.623 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a} \cdot 0.596 \text{ Kg/m}^3) = 6751859$$

$$\text{Diesel } (457.606 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{a} \cdot 0.837 \text{ Ton/m}^3) = 383016$$

$$\text{Carb3n } 11071.852 \times 10^3 \text{ Ton / a} \cdot \text{a}$$

Generaci3n de energ3a el3ctrica con combustibles f3siles en 2001:

G. Natural 15.5 %

Combust3leo 67.1%

Diesel 1.2 %

Carb3n 10.8%

Otros 5.4 %

Producci3n bruta de electricidad en 2001. 197,106 GWh