

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY



ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA A
POTENCIA - APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA,
CONTAMINACIÓN Y NUEVAS TECNOLOGÍAS

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS ESPECIALIDAD

EN INGENIERÍA AMBIENTAL

P R E S E N T A

FERNANDO MAYORCA CASILLAS

GUADALAJARA, JAL. DICIEMBRE DE 1997

INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY



ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE CONVERSION DE ENERGIA A
POTENCIA : APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA,
CONTAMINACION Y NUEVAS TECNOLOGIAS.

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS ESPECIALIDAD
EN INGENIERIA AMBIENTAL
P R E S E N T A :
FERNANDO MAYORGA CASILLAS
GUADALAJARA, JAL , DICIEMBRE DE 1997

**ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE CONVERSION DE
ENERGIA A POTENCIA: APROVECHAMIENTO DE LA
ENERGIA, CONTAMINACION Y NUEVAS TECNOLOGIAS**

TESIS

**MAESTRIA EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA AMBIENTAL**

**INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY**

POR

FERNANDO MAYORGA CASILLAS

DICIEMBRE DE 1997

**ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE CONVERSION DE
ENERGIA A POTENCIA: APROVECHAMIENTO DE LA
ENERGIA, CONTAMINACION Y NUEVAS TECNOLOGIAS**

POR

FERNANDO MAYORGA CASILLAS

TESIS

**Presentada a la División de Graduados e Investigación
Este Trabajo es Requisito Parcial
para Obtener el Título de
Maestro en Ciencias**

**INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY**

DICIEMBRE DE 1997

*Un agradecimiento muy
especial a todos aquellos
que hicieron posible la
realización de este proyecto
por su apoyo, su tiempo y
su consejo.*

RESUMEN

En el presente trabajo se lleva a cabo un estudio sobre los sistemas de generación de potencia en el que se integran tanto los sistemas convencionales como los que utilizan tecnologías avanzadas, desde el punto de vista del Desarrollo Sostenible. Se estructuró de tal forma que pueda utilizarse como apoyo en cursos relacionados con la conversión de energía como pueden ser termodinámica, ingeniería térmica o máquinas térmicas entre otros.

En cada capítulo se trata en general sobre los principios de funcionamiento de los sistemas tratados, sus fuentes de energía, emisiones de contaminantes, causas adversas de estos y medidas que ayude a mitigarlas. También se incluyen costos típicos de los diferentes sistemas.

Para su análisis se aplican la primera y segunda ley de la termodinámica, balances de energía para sistemas reactivos y las relaciones de equilibrio químico. Se aplicaron los ciclos teóricos y como punto de comparación el ciclo de Carnot por tratarse del ciclo termodinámico ideal que modela a una máquina térmica. Se presentan métodos para realizar cálculos teóricos de emisiones de contaminantes que permiten comparar diferentes alternativas entre combustibles o tecnologías. Los cálculos de equilibrio en motores de combustión interna, por su complejidad, se realizaron por medio de un programa de computadora diseñado específicamente para este fin. También se presentan datos de costos y emisiones típicas de contaminantes para diversas tecnologías y combustibles obtenidos de diferentes fuentes de información.

Los sistemas tradicionales que se estudian en este trabajo son los ciclos de motores de combustión interna, ciclos de turbinas de gas y de turbinas de vapor.

Los sistemas no convencionales incluidos son la eólica, fotovoltaica, solar térmica, celdas de combustión, geotermia, ciclo combinado y cogeneración.

Se analiza también el uso de diferentes combustibles de acuerdo a la tecnología. En los motores de combustión interna se compara su desempeño con gasolina, gas natural, gas L.P., alcoholes e hidrógeno. Se trata también con el automóvil eléctrico y el híbrido. Para los sistemas de generación de energía eléctrica se incluye el carbón, gas natural, combustóleo, combustibles radiactivos y fuentes de energía renovable como son la solar térmica, fotovoltaica, geotérmica, eólica, y la biomasa.

INDICE

INTRODUCCION	1
1. MAQUINAS TERMICAS.....	4
1.1. Máquina de Carnot.....	7
2. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	11
2.1 El ciclo Otto.....	11
2.2. El ciclo Diesel.....	15
2.3. El ciclo Dual	19
2.4 Contaminantes relacionados con los motores de combustión interna	21
2.4.1. Compuestos orgánicos volátiles (VOCs).....	23
2.4.2 Óxidos de nitrógeno (NOx).....	24
2.4.3. Monóxido de carbono, CO.....	25
2.4.4. Partículas sólidas (PM).....	26
2.4.5. Bióxido de carbono (CO ₂).....	26
2.4.6. Plomo.....	27
2.4.7. Smog fotoquímico.	28
2.5. Reducción de la contaminación en motores de combustión interna	30
2.5.1. El convertidor catalítico	30
2.5.2. Combustibles alternos en vehículos	32
2.5.3. El automóvil eléctrico.	36
2.6. Análisis comparativo de las alternativas para motores de combustión interna	38
2.6.1 Características inherentes	39
2.6.1.1 Eficiencia térmica y combustibles.....	39
2.6.1.2 Densidad de energía.	41
2.6.1.3 Emisiones de CO ₂ en motores que funcionan de acuerdo al ciclo Otto.....	44
2.6.1.4 Formación térmica de CO y NO en motores que funcionan de acuerdo al ciclo Otto.	45
2.6.1.5. Reactividad de los hidrocarburos.....	53
2.6.1.6 Comparación de los aspectos inherentes al combustible.	54
2.6.2 Viabilidad de los combustibles.....	56
3. GENERACIÓN DE ENERGÍA EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS A PARTIR DE VAPOR60	
3.1 Efecto invernadero.....	62
3.2 El ciclo Rankine.....	67
3.2.1 Eficiencia del ciclo Rankine.....	69
3.2.2 Eficiencia adiabática de la bomba y la turbina.....	71
3.3 Mejoras al ciclo y a la eficiencia térmica.....	73

3.3.1 El ciclo Rankine con regeneración.....	74
3.4 Combustibles y contaminación.....	76
3.4.1 Emisiones de CO ₂	76
3.5 Reactores nucleares.....	80
3.5.1 Residuos radiactivos.....	83
3.5.2 Radiación y sus riesgos.....	83
3.6 Energéticos renovables en la caldera.....	85
3.6.1 Biomasa.....	85
3.6.2 Energía geotérmica.....	88
3.6.3 Energía solar térmica.....	91
4. CICLOS DE POTENCIA DE TURBINA DE GAS.....	96
4.1 Ciclo Brayton.....	97
4.2 Emisiones de NO en un ciclo Brayton.....	101
4.3 Lluvia ácida.....	106
4.3.1 Efectos nocivos de la lluvia ácida.....	107
4.4 Mejoras al ciclo Brayton y a la eficiencia térmica.....	109
4.4.1 Ciclo regenerativo de turbina de gas.....	110
4.4.2 Ciclo de turbina de gas con enfriamiento intermedio y recalentamiento.....	116
4.5 El ciclo combinado.....	120
4.6 Cogeneración.....	125
4.7 ¿Gas natural o carbón?.....	128
5. CONVERSIÓN DIRECTA DE LA ENERGÍA.....	129
5.1 Celdas de combustión.....	129
5.1.1 Funcionamiento de las celdas de combustión.....	130
5.1.2 Tipos de celdas de combustión.....	132
5.1.3 Reformado del combustible.....	135
5.1.4 Eficiencia de las celdas de combustión.....	136
5.1.5 Pérdidas de eficiencia en las celdas de combustión.....	139
5.1.6 Ventajas de las celdas de combustión.....	141
5.2 Celdas fotovoltaicas.....	143
5.2.1 Costos.....	145
5.2.3 El uso de las celdas fotovoltaicas e impacto ambiental.....	147
5.2.4 Especificaciones.....	147
5.2.5 Eficiencia.....	148
5.2.6 Sistema híbrido.....	149
5.2.7 Ventajas y desventajas.....	149

5.3 Energía eólica	151
5.3.1 La turbina o generador eólico	152
5.3.2 Principios de operación:	153
5.3.3. Ventajas y Desventajas de los sistemas eólicos	157
5.3.4 Costo de la energía eólica	158
5.3.5. Costos ambientales.	160
5.3.6 Beneficios ambientales.....	161
5.3.7 Solución híbrida	164
CONCLUSIONES	167
APENDICE A	171
ANEXO 1	172
ANEXO 2	192
BIBLIOGRAFIA.....	194
VITA	201

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 MÁQUINAS TÉRMICAS, EFICIENCIA Y CONTAMINACIÓN.....	5
FIGURA 1.2 DIAGRAMA DE UNA MÁQUINA TÉRMICA.....	6
FIGURA 1.3 PROCESOS QUE SIGUE EL CICLO DE CARNOT EN LOS DIAGRAMAS P-V Y T-S.....	8
FIGURA 1.4 DISMINUCIÓN DE EMISIONES DE CO ₂ Y EN CONSUMO DE COMBUSTIBLES CON EL AUMENTO DE EFICIENCIA EN LAS CELDAS DE COMBUSTIÓN.....	10
FIGURA 2.1 FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CUATRO TIEMPOS CON IGNICIÓN POR CHISPA.....	12
FIGURA 2.2 DIAGRAMAS P-V Y T-S QUE MUESTRAN LOS PROCESOS DEL CICLO OTTO.....	13
FIGURA 2.3 EFICIENCIA TÉRMICA DEL CICLO OTTO CON AIRE ESTÁNDAR EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN R Y LA RELACIÓN DE CAPACIDADES CALORÍFICAS K.....	15
FIGURA 2.4 MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CON IGNICIÓN POR COMPRESIÓN.....	16
FIGURA 2.5 PROCESOS DEL CICLO DIESEL EN LOS DIAGRAMAS P-V Y T-S.....	17
FIGURA 2.6 EFICIENCIA TÉRMICA DEL CICLO DIESEL EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE CORTE Y LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN PARA UN VALOR CONSTANTE DE K (K=1.4).....	18
FIGURA 2.7 PROCESOS QUE SIGUE EL CICLO DUAL EN LOS DIAGRAMAS P-V Y T-S.....	19
FIGURA 2.8 FUENTES POTENCIALES DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES DE UN AUTOMÓVIL QUE NO CUENTA CON DISPOSITIVOS DE CONTROL.....	21
FIGURA 2.9 EMISIÓN RELATIVA DE CONTAMINANTES POR UN MOTOR DE GASOLINA EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN AIRE - COMBUSTIBLE (A/C).....	22
FIGURA 2.10 INCREMENTO DEL CONTENIDO DE PLOMO EN EL HIELO POLAR.....	27
FIGURA 2.11 ESQUEMA GENERAL EN LA FORMACIÓN DEL SMOG FOTOQUÍMICO.....	30
FIGURA 2.12 COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE LOS AUTOMÓVILES CON Y SIN CONVERTIDOR CATALÍTICO.....	32
FIGURA 2.13 EFICIENCIA TÉRMICA TEÓRICA MÁXIMA PARA UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA QUE FUNCIONA DE ACUERDO CON EL CICLO OTTO.....	41
FIGURA 2.14 DENSIDAD DE ENERGÍA EFECTIVA TEÓRICA DE DIFERENTES COMBUSTIBLES EN UN MOTOR QUE FUNCIONA DE ACUERDO AL CICLO OTTO.....	43
FIGURA 2.15 COMPARACIÓN GRÁFICA DE EMISIONES DE CO ₂ PARA DIFERENTES COMBUSTIBLES UTILIZADOS EN UN MOTOR QUE SIGUE EL CICLO OTTO.....	45
FIGURA 2.16 FORMACIÓN TÉRMICA DE NO PARA DIFERENTES COMBUSTIBLES.....	51
FIGURA 2.17 TEMPERATURA DE COMBUSTIÓN MÁXIMA ALCANZADA POR DIFERENTES COMBUSTIBLES EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CON IGNICIÓN POR CHISPA.....	52
FIGURA 2.18 EMISIONES DE CO PARA DIFERENTES COMBUSTIBLES EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CON IGNICIÓN POR CHISPA.....	53
FIGURA 2.19 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS INHERENTES A LOS COMBUSTIBLES.....	55
FIGURA 2.20. GRÁFICA COMPARATIVA DE LOS COSTOS DE LOS COMBUSTIBLES POR DENSIDAD DE ENERGÍA.....	57
FIGURA 2.21 COMPARACIÓN DE LAS CALIFICACIONES TOTALES DE LA VIABILIDAD DE LOS COMBUSTIBLES.....	59
FIGURA 3.6 CICLO RANKINE CON RECALENTAMIENTO, ESQUEMA Y DIAGRAMA T-S.....	69
FIGURA 3.7 PROCESOS ADIBÁTICO REVERSIBLE (ISOENTRÓPICO) Y ADIBÁTICO IRREVERSIBLE EN UNA TURBINA Y EN UNA BOMBA.....	72
FIGURA 3.8 CICLO RANKINE IRREVERSIBLE CON RECALENTAMIENTO.....	73
FIGURA 3.9 CALENTADORES DE AGUA DE ALIMENTACIÓN.....	74
FIGURA 3.10 CICLO RANKINE REGENERATIVO CON RECALENTAMIENTO.....	75
FIGURA 3.11 EMISIONES DE CO ₂ POR UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA PARA DIFERENTES COMBUSTIBLES Y EFICIENCIAS TÉRMICAS.....	79
FIGURA 3.12 EMISIONES DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES POR LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS.....	80
FIGURA 3.13 DESINTEGRACIÓN DE UN ÁTOMO DE URANIO 235 AL RECIBIR EL IMPACTO DE UN NEUTRÓN.....	81
FIGURA 3.14 FUENTES DE EXPOSICIÓN A RADIACIÓN IONIZANTE.....	84
FIGURA 3.15 CICLO BIOMASA – ENERGÍA.....	87

FIGURA 3.16 SISTEMAS GEOTÉRMICOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	90
FIGURA 3.17 SISTEMA CENTRAL DE TORRE PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE ENERGÍA SOLAR.	91
FIGURA 3.18 EMISIÓN DE ENERGÍA RADIANTE DE UN CUERPO NEGRO A DIFERENTES TEMPERATURAS.	92
FIGURA 3.19 VARIACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN UNA CENTRAL SOLAR EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA Y EL FACTOR DE CONCENTRACIÓN.	93
FIGURA 4.1 COMPONENTES BÁSICOS DE UNA SISTEMA DE GENERACIÓN DE POTENCIA POR TURBINA DE GAS.	96
FIGURA 4.2 DIAGRAMAS P-V Y T-S DEL CICLO BRAYTON.	97
FIGURA 4.3 EFECTO DE LA RELACIÓN DE PRESIONES EN LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL CICLO BRAYTON.	99
FIGURA 4.4 EFECTO DEL INCREMENTO EN LA RELACIÓN DE PRESIONES EN LA SALIDA DE TRABAJO NETO EN UN CICLO BRAYTON.	100
FIGURA 4.5 EFICIENCIA TÉRMICA DEL CICLO BRAYTON EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA LÍMITE.	101
FIGURA 4.6 FORMACIÓN DE NO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS GASES DE ENTRADA A LA TURBINA.	105
FIGURA 4.7 CICLO BRAYTON CON EXPANSIÓN Y COMPRESIÓN IRREVERSIBLES.	109
FIGURA 4.8 CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN.	110
FIGURA 4.9 EFECTO DE LA REGENERACIÓN EN UN CICLO BRAYTON.	112
FIGURA 4.10 EFICIENCIA TÉRMICA DE UN CICLO DE TURBINA DE GAS PARA TRES SITUACIONES DIFERENTES.	116
FIGURA 4.11 DIAGRAMAS P-V Y T-S PARA UN PROCESO DE COMPRESIÓN.	117
FIGURA 4.12 COMPRESIÓN IDEAL CON ENFRIAMIENTO INTERMEDIO EN DOS ETAPAS.	118
FIGURA 4.13 CICLO DE TURBINA DE GAS CON ENFRIAMIENTO INTERMEDIO, RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN.	119
FIGURA 4.14 DIAGRAMA T-S PARA EL CICLO REPRESENTADO EN LA FIGURA 4.13.	120
FIGURA 4.15 CALOR DISPONIBLE EN EL PROCESO DE RECHAZO DE CALOR DEL CICLO BRAYTON.	121
FIGURA 4.16 CICLO COMBINADO FORMADO POR LOS CICLOS BRAYTON Y RANKINE SENCILLOS.	124
FIGURA 4.17 CONFIGURACIONES BÁSICAS DE LOS SISTEMAS DE COGENERACIÓN.	126
FIGURA 4.18 EFECTIVIDAD EN SISTEMAS DE COGENERACIÓN CON TURBINA DE VAPOR Y CON TURBINA DE GAS.	127
FIGURA 5.1 FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA DE COMBUSTIÓN.	130
FIGURA 5.2 MÓDULOS DE CELDAS DE COMBUSTIÓN CONECTADAS EN SERIE Y EN PARALELO.	132
FIGURA 5.3 EFICIENCIAS ISOTÉRMICAS IDEALES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIÓN Y DE UNA MÁQUINA TÉRMICA DE CARNOT.	138
FIGURA 5.4 PÉRDIDAS DE VOLTAJE EN UNA CELDA DE COMBUSTIÓN.	140
FIGURA 5.5 EFICIENCIA CELDAS DE COMBUSTIÓN VS MCI EN APLICACIONES DE TRANSPORTE.	140
FIGURA 5.6 EFICIENCIAS TÉRMICAS DE CELDAS DE COMBUSTIÓN Y SISTEMAS CONVENCIONALES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	141
FIGURA 5.7 COMPARATIVO DE COSTOS DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA Y DE UNA PLANTA DE DIESEL.	146
FIGURA 5.8 DISMINUCIÓN DEL COSTO DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LOS ÚLTIMOS AÑOS.	147
FIGURA 5.9 HÉLICE DE VIENTO EXPUESTA A UNA CORRIENTE DE AIRE.	154
FIGURA 5.10 TENDENCIA EN LOS COSTOS DE FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE.	160
FIGURA 5.11 COMPARATIVO DE COSTOS DE GENERACIÓN Y AMBIENTALES.	161
FIGURA 5.12 REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA EÓLICA INSTALADA.	163
FIGURA 5.13 SISTEMA HÍBRIDO CELDA COMBUSTIÓN – FOTOVOLTAICA – EÓLICA.	165

INTRODUCCION

La obtención de energía útil se ha hecho tradicionalmente a partir de los combustibles de origen fósil, derivados del petróleo y el carbón que son fuentes de energía no renovables. El consumo de estos combustibles se ha ido incrementando en forma exponencial debido principalmente a los bajos costos de estos y al exagerado hábito consumista y de despilfarro, especialmente en los países denominados desarrollados que ha traído como consecuencia una serie de problemas ambientales que afectan a todos los niveles, tanto en las regiones donde se producen como el caso del smog fotoquímico y la lluvia ácida, y a nivel global como es el caso del calentamiento global del planeta.

Los sistemas que llevan a cabo la conversión de la energía de los combustibles a potencia o electricidad funcionan como máquinas térmicas. En estas, la energía del combustible se extrae en forma de calor del cual una parte se transforma en potencia o trabajo eléctrico y el resto de la energía se tira al ambiente. Debido a la relativa abundancia de los combustibles fósiles, los sistemas tradicionales son sumamente ineficientes de tal suerte que se aprovecha solamente alrededor de una tercera parte de su contenido energético.

Estos tipos de sistemas se estudian en las escuelas de ingeniería en materias como la termodinámica y la ingeniería térmica, en las que tradicionalmente se analizan desde el punto de vista de sus principios de funcionamiento y la eficiencia térmica, sin embargo, no se consideran los problemas ambientales, los efectos dañinos de los contaminantes ni el uso de fuentes de energía renovables que puedan sustituir a los sistemas convencionales.

Sin embargo, gracias a los avances tecnológicos ya se encuentran disponibles sistemas alternos de generación de energía que son más eficientes que los sistemas convencionales, aprovechando mejor sus fuentes de energía y contaminando menos.

En junio de 1996 se llevó a cabo la Cumbre Hemisférica sobre Desarrollo Sostenible en México¹, donde se plantearon una serie de propuestas encaminadas a dar solución o mitigar la problemática relacionada con el medio ambiente, el mal uso y desaprovechamiento de nuestros recursos, así como su relación con nuestra sociedad. Algunas de las propuestas son las siguientes:

“Generar material didáctico acorde a nuestro país. Para diferentes audiencias, regiones y niveles educativos, para propósitos distintos también”.

“Generar programas de estudio a todos los niveles que garanticen la difusión de una cultura ambiental. Entender la educación ambiental como una educación global, actualizando anualmente los programas de estudio”.

¹ Centro de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo Sostenible, Web.

“Promover el intercambio de tecnologías no contaminantes”.

Por lo anterior, se propone la investigación del presente trabajo encaminada a plantear los sistemas de generación de energía tradicionales mediante ciclos de potencia, los problemas de contaminación asociados con estos y las tecnologías avanzadas con procesos más eficientes, que utilizan energéticos renovables, contaminan menos y contribuyen al desarrollo sostenible. Se pretende que el contenido del trabajo pueda aplicarse en los cursos de termodinámica o ingeniería térmica de tal manera que los actuales estudiantes de ingeniería lleguen a ser profesionistas con una visión más amplia en lo que se refiere a sistemas de generación de energía, ya que no solamente tendrán criterios de los sistemas convencionales, sino también de nuevas tecnologías y de la problemática ambiental que se vive.

La investigación llevada a cabo es principalmente del tipo de investigación documental, habiéndose consultado artículos de revistas científicas, libros de texto de termodinámica, libros diversos sobre ingeniería ambiental y una gran cantidad de direcciones web a través de internet.

El primer capítulo trata del modelo tradicional de las máquinas térmicas sus relaciones con contaminantes y las ecuaciones básicas de estas. Se incluye también la máquina de Carnot como modelo teórico de comparación de las máquinas térmicas.

En el segundo capítulo se estudian los motores de combustión interna. Su funcionamiento, los ciclos teóricos Otto, Diesel y Dual. Se hace un análisis de su desempeño con diferentes combustibles en cuanto a eficiencia térmica, contaminantes y se comparan desde el punto de vista de las características inherentes a los combustibles y su viabilidad. En este capítulo se plantea el problema del smog fotoquímico urbano. Se plantean alternativas para la reducción de la contaminación mediante el convertidor catalítico, el uso del automóvil eléctrico y el híbrido.

El capítulo tres trata de las centrales termoelectricas con turbina de vapor, las cuales trabajan de acuerdo al ciclo Rankine, analizando las diferentes configuraciones que se pueden adoptar en este ciclo y como afectan a la eficiencia térmica, así como las emisiones de contaminantes para diferentes combustibles. Se incluye aquí el problema del calentamiento global del planeta o efecto invernadero. Más adelante se trata sobre tecnologías alternas como son la energía nuclear, también con su problemática ambiental. Se trata de los energéticos renovables aplicables a estos sistemas como son la geotermia, la biomasa y la solar térmica.

En el cuarto capítulo son las centrales termoelectricas de turbina de gas las que se estudian, partiendo del ciclo Brayton, también analizando las diferentes modificaciones que permiten mejorar la eficiencia térmica, así como los problemas de contaminación asociados a estos sistemas. Se plantea el problema relacionado con la lluvia ácida, sus causas, efectos

adversos, y medidas de mitigación. Se plantean sistemas que permiten aprovechar la energía que se desperdicia como calor de rechazo mediante el ciclo combinado y la cogeneración.

Ya en el capítulo cinco se analizan los sistemas de conversión directa de la energía. Las celdas de combustión que convierten directamente la energía química de los combustibles a energía eléctrica. La fotovoltaica que transforma la energía radiante proveniente del sol en energía eléctrica y la energía eólica o del viento que convierte la energía cinética del viento en eléctrica. Se estudian desde el punto de vista de su funcionamiento, estado de desarrollo, costos, beneficios ambientales y sus ventajas y desventajas.

Algunas aportaciones importantes del trabajo respecto a los textos que presentan los temas tratados son la inclusión de cálculos de emisiones teóricas de contaminantes, datos típicos de emisiones de sistemas reales, efectos adversos de los contaminantes asociados con las diferentes tecnologías, principios de funcionamiento de tecnologías avanzadas, costos típicos de tecnologías tradicionales, de nuevas tecnologías y tendencias.

1. MAQUINAS TERMICAS

La obtención de energía útil para el hombre (potencia o energía eléctrica) se ha hecho tradicionalmente mediante el uso de máquinas térmicas, las cuales en la mayoría de los casos utilizan algún combustible de origen fósil. La energía se extrae del combustible mediante su combustión en presencia de aire, convirtiendo de esta manera la energía química presente almacenada en enlaces químicos en energía térmica que se transfiere en forma de calor hacia el fluido de trabajo de la máquina térmica. La máquina térmica en cuestión transforma ese calor en trabajo mecánico, se hace girar un eje, ya sea que se utilice directamente como es el caso de los automóviles, transporte aéreo y marítimo o se mueva un generador que transforma este movimiento en energía eléctrica, la que se transmite mediante líneas de conducción hasta su destino, las ciudades, industrias, etc.

Una de las limitaciones de estos métodos de generación de energía eléctrica mediante este procedimiento es la baja eficiencia de conversión de las máquinas térmicas, las cuales desperdician la mayor parte de la energía que reciben, tirándola al ambiente en forma de calor. Aún las máquinas térmicas ideales, no son capaces de lograr una conversión al 100%, su límite lo establece la eficiencia térmica del ciclo de Carnot de acuerdo con los postulados del segundo principio de la termodinámica.

Un problema asociado a lo anterior es que estos sistemas utilizan fuentes no renovables de energía, principalmente combustibles de origen fósil y combustibles radioactivos. Algunas eficiencias típicas de estos sistemas reportadas en la literatura son²:

Motores de automóvil de gasolina	18%
Motores de automóvil diesel	24%

Plantas de generación de energía eléctrica

Motor de gas	25 - 33%
Motor diesel	35 - 40%
Turbina de gas industrial	20 - 40%
Planta de potencia a vapor	40 - 45%

Esto significa que convierten menos de la mitad de la energía desprendida por el combustible en energía útil y el resto se pierde disipándose en el medio ambiente en forma de calor.

² Drenckhahn et. al. *Fuel Cells For Mobile and Stationary Applications* pag 21, 22

Debido a las bajas eficiencias con que trabajan, consumen una gran cantidad de combustibles, en cantidades mayores a las que se podrían regenerar naturalmente, por lo que se llegarán a agotar en un plazo no muy largo. De acuerdo con C.J. Campbell (1996), la producción mundial de petróleo declinará alrededor del año 2000 (1998 para México), teniendo como consecuencia una menor disponibilidad de este recurso y su encarecimiento.

Adicionalmente a lo anterior, la cantidad de combustibles que se utilizan actualmente, está generando serios problemas ambientales, ya que los productos de combustión de los hidrocarburos que se tiran, superan la capacidad del ambiente para absorberlos y reintegrarlos al ciclo natural. Entre estos destaca el calentamiento global del planeta por la emisión de gases de invernadero (CO_2 y CH_4 entre otros), la lluvia ácida (NO_x , SO_2) y el smog fotoquímico (NO_x , compuestos orgánicos volátiles COVs y su interacción con la radiación ultravioleta) en las urbes con gran concentración de autos circulando. La figura 1.1 muestra una reacción de combustión en forma general, indicando los productos más comunes y los efectos que éstos tienen sobre el medio ambiente.

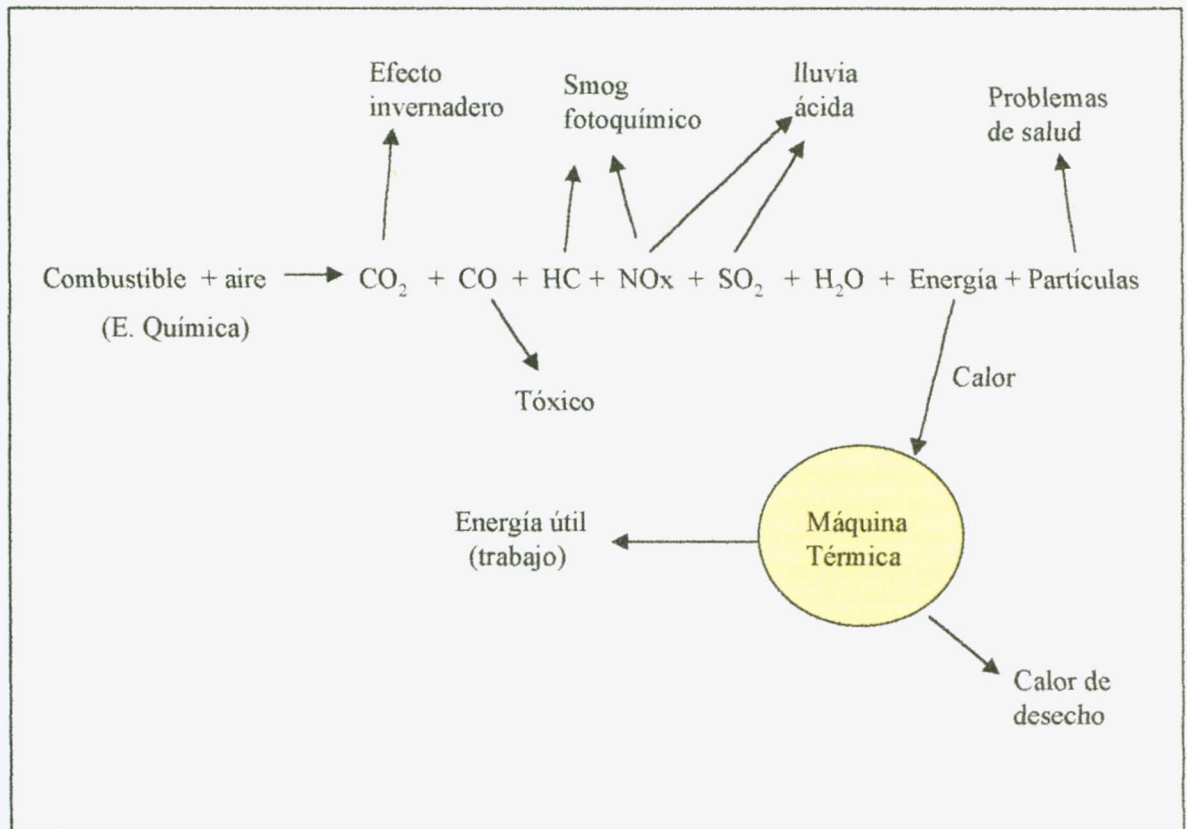


Figura 1.1 Máquinas térmicas, eficiencia y contaminación.

Al quemar un combustible se obtiene energía térmica que se transforma en alguna forma de energía útil, como trabajo o potencia, mediante las máquinas térmicas. No toda la energía térmica es aprovechada y una parte importante se desecha al medio ambiente. Las sustancias

resultantes de la combustión (productos de combustión) cuando son emitidas en exceso provocan diversos efectos adversos sobre el medio ambiente.

Las máquinas térmicas se definen como “*sistemas cerrados que operan cíclicamente y producen trabajo intercambiando calor a través de sus fronteras*”. Esto significa, que la máquina recibe calor de un depósito de alta temperatura T_H , una fracción de éste lo convierte en trabajo y la parte restante la rechaza a un depósito de baja temperatura T_L o sumidero, usualmente los alrededores, ya sea la atmósfera, el agua de un río, un lago o el mar. La figura 1.2 representa una máquina térmica que interactúa con dos depósitos de calor y produce trabajo.

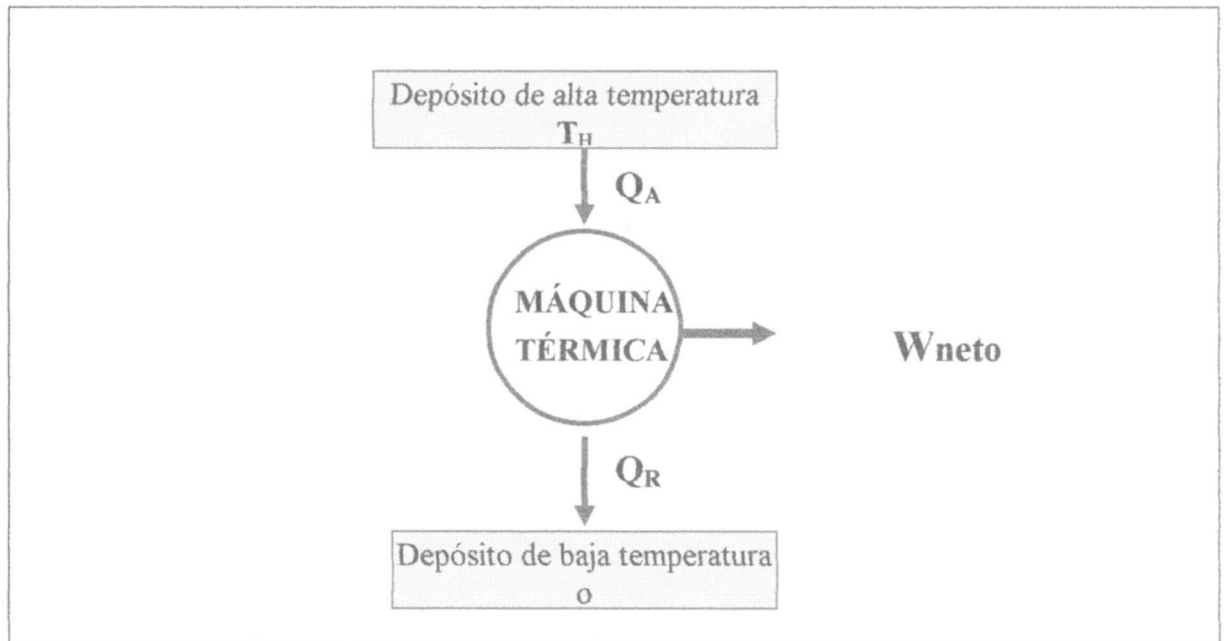


Figura 1.2 Diagrama de una máquina térmica.

Recibe calor (Q_A) de una región de alta temperatura T_H , una parte de este se convierte en trabajo (W_{neto}) y el resto se rechaza como calor (Q_R) a un depósito de baja temperatura o sumidero (generalmente los alrededores).

La eficiencia de una máquina térmica se define como la relación entre la producción de energía útil deseada entre la energía suministrada con la máquina térmica.

$$\eta = \frac{\text{Trabajo Neto}}{\text{Calor Añadido}} = \frac{W_{neto}}{Q_A}$$

En donde W_{neto} es el trabajo útil que entrega la máquina, es decir, es la diferencia entre el trabajo que produce y el que consume y que de acuerdo con la primera ley de la

termodinámica se puede expresar como la diferencia entre el calor que se le añade o recibe (Q_A) el ciclo menos el calor que rechaza o sale del ciclo (Q_R).

$$W_{neto} = W_{produce} - W_{consume} = |Q_A| - |Q_R|$$

De acuerdo con la convención de signos utilizada en termodinámica, Q_A deberá tener signo positivo, ya que es energía que entra al sistema, W_{neto} y Q_R signo negativo por tratarse de energía que sale del sistema, sin embargo, en el estudio de máquinas térmica se suelen tomar los valores absolutos de estos términos.

La eficiencia térmica de una máquina térmica en función de estos términos es entonces:

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{añadido}} = \frac{|Q_A| - |Q_R|}{|Q_A|} = 1 - \frac{|Q_R|}{|Q_A|}$$

Con fines prácticos, de aquí en adelante se tomarán los valores de Q_A y de Q_R como positivos sin necesidad de indicar que se trata de su valor absoluto. De esta manera, la eficiencia térmica se escribirá:

$$\eta = 1 - \frac{Q_R}{Q_A}$$

1.1. Máquina de Carnot

La máquina térmica de Carnot opera con un ciclo totalmente reversible, es decir, todos los procesos que forman el ciclo son reversibles. A este ciclo se le conoce como ciclo de Carnot. Está compuesto de cuatro procesos, dos isotérmicos reversibles y dos adiabáticos reversibles o isoentrópicos, ver la figura 1.3.

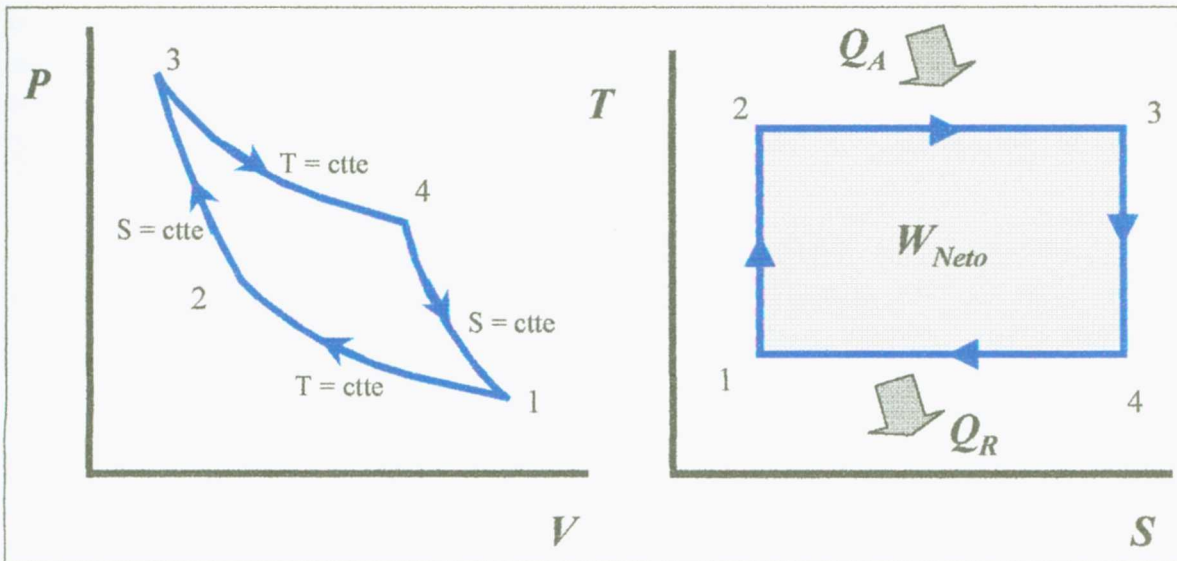


Figura 1.3 Procesos que sigue el ciclo de Carnot en los diagramas P-V y T-S

Donde: 1-2 compresión adiabática reversible (isoentrópica).
 2-3 adición de calor isotérmica
 3-4 expansión adiabática reversible (isoentrópica)
 4-1 rechazo de calor isotérmico.

T_H es la temperatura a la que se encuentra el depósito de alta temperatura desde que se suministra el calor, y T_L la del depósito de baja temperatura o sumidero hacia donde se rechaza el calor.

De los procesos de adición y rechazo de calor, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica se obtienen las siguientes expresiones.

$$Q_A = T_H \cdot \Delta S \quad \text{y} \quad Q_R = T_L \cdot \Delta S$$

La eficiencia térmica de la máquina de Carnot, de acuerdo con sus procesos, es:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{Q_R}{Q_A} = 1 - \frac{T_L \cdot \Delta S}{T_H \cdot \Delta S}$$

$$\boxed{\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}}$$

Siendo esta la máxima eficiencia que cualquier máquina térmica puede alcanzar cuando opera entre dos depósitos de calor cuyas temperaturas son T_H y T_L . Debido a la

irreversibilidades, las eficiencias que alcanzan las máquinas térmicas reales siempre serán menores que la máquina térmica de Carnot³. Cuando se pretende hacer una modificación o mejora, entonces el rendimiento térmico de las máquinas reales se deberá comparar con respecto a la eficiencia de Carnot y no con el 100%, ya que esto nos dará una idea de cuánto más se puede mejorar o no la eficiencia.

Es importante hacer notar que un incremento en la eficiencia no implica una disminución de emisiones o de consumo de combustible en el mismo porcentaje, sino que se da en una proporción mayor. Por ejemplo, si comparamos una máquina térmica 1, cuya eficiencia térmica es del 40% y otra máquina térmica mejorada 2 con una eficiencia del 50%, entonces esta última producirá, bajo condiciones similares de operación, un 20% menos de CO₂, NO_x, CO, SO_x y consumirá 20% menos de combustible. Esto se puede demostrar de la siguiente manera:

La masa de combustible utilizada se puede calcular a partir del poder calorífico del combustible, y a su vez la cantidad de CO₂, NO_x, CO, y SO_x que se producirán durante la combustión dependerá de la masa de combustible consumida en proporción directa.

$Q = m PC$, m = masa de combustible y PC es el poder calorífico (energía en forma de calor que produce un combustible al ser quemado).

Sea m_1 la masa de combustible consumida por la máquina térmica 1 y m_2 la que consume la máquina térmica 2, entonces, el ahorro de combustibles es:

$$\% \text{ de ahorro} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \left(\frac{PC}{PC} \right) \times 100 = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100$$

De la ecuación de eficiencia térmica, $\eta = \frac{W}{Q}$ se obtiene $Q = \frac{W}{\eta}$

Entonces, $\% \text{ de ahorro} = \frac{\frac{W}{\eta_1} - \frac{W}{\eta_2}}{\frac{W}{\eta_1}} \times 100 = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2} \times 100$, ya que W es el mismo en

las dos máquinas térmicas.

Para $\eta_1 = 40\%$ y $\eta_2 = 50\%$, el ahorro en combustible o la disminución en emisiones es:

$$\frac{0.5 - 0.4}{0.5} \times 100 = 20\%$$

En la figura 1.4 se pueden ver gráficamente los resultados para diferentes eficiencias térmicas de una máquina térmica contra el incremento porcentual en eficiencia térmica.

³ Wark, TERMODINAMICA, pag. 606,607

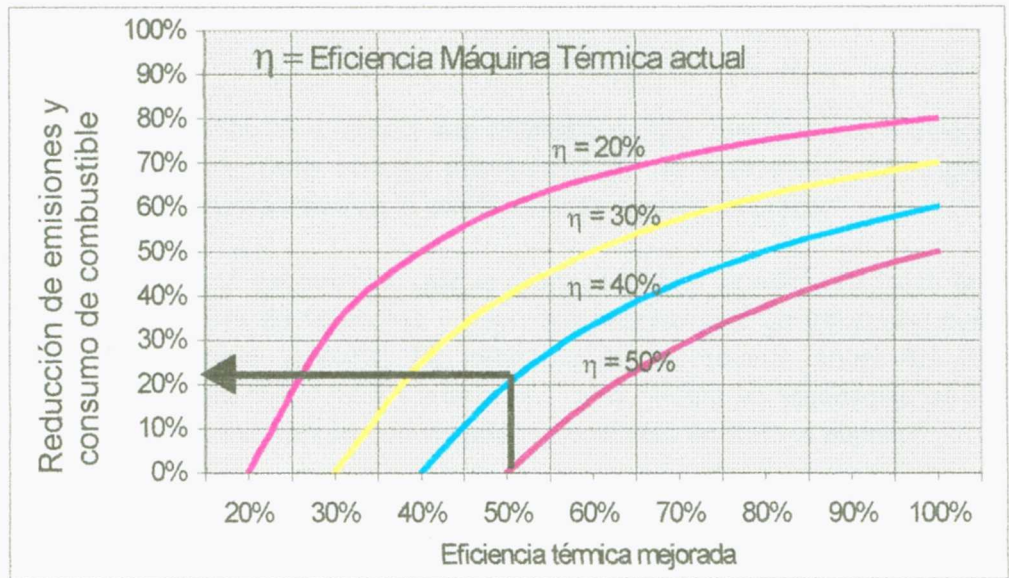


Figura 1.4 Disminución de emisiones de CO₂ y en consumo de combustibles con el aumento de eficiencia en las celdas de combustión.

Esto puede aplicarse a cualquier dispositivo al comparar su eficiencia térmica con otro dispositivo de menor eficiencia, por ejemplo, una planta de turbina de gas contra una de ciclo combinado. No se deberá aplicar este criterio utilizando eficiencias de cogeneración, ya que estas últimas incluyen el aprovechamiento del combustible en la producción de energía térmica y no solamente de trabajo o potencia.

Como conclusión de esto se puede decir que a pesar de que se logren pequeños aumentos en la eficiencia térmica, se pueden tener aportaciones importantes al desarrollo sostenible, ya que como resultado se logra un mayor porcentaje en la disminución de las emisiones de contaminantes y consumo de combustibles en comparación con el incremento logrado en eficiencia térmica.

2. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.

Los motores de combustión interna son dispositivos que funcionan cíclicamente y cuya función es la conversión de la energía proveniente de un combustible de origen fósil en potencia, ya sea para transporte o en la producción de energía eléctrica.

Alrededor de la mitad del petróleo que se produce a nivel mundial (Deborah et al, 1990) se consume por millones de vehículos y cuyo crecimiento está en constante aumento. El incremento en el parque vehicular ha mostrado un incremento anual del 4.7% para automóviles y 5.1% para camionetas y autobuses. De continuar las tendencias, se estima que para el año 2030 habrá mil millones de vehículos circulando en todo el planeta⁴.

El funcionamiento de los motores se modela mediante los ciclos Otto, Diesel y el ciclo Dual, que para fines de análisis de su funcionamiento se utiliza aire normal como sustancia de trabajo.

Se habla de un ciclo con aire normal cuando el fluido de trabajo que se utiliza es aire, se comporta como gas ideal y sus capacidades caloríficas no dependen de la temperatura, es decir, son constantes. Implica también que los procesos de adición y rechazo de calor se realizan mediante procesos de transferencia de calor desde o hacia una fuente externa o depósito de calor, es decir, en estos dos procesos no hay combustibles ni productos de combustión, solamente aire que cambia de estado durante los diferentes procesos que forman el ciclo termodinámico que se esté estudiando.

Los resultados obtenidos del análisis del ciclo con aire normal generalmente no corresponden con los de sistemas reales, pero ayudan a determinar los parámetros y variables de mayor relevancia que afectan el funcionamiento y la eficiencia de la máquina térmica.

2.1 El ciclo Otto

El ciclo Otto se ha utilizado para modelar el funcionamiento de los motores de combustión interna encendidos por chispa, siendo el de cuatro tiempos el más utilizado para el transporte y la producción de energía eléctrica. En la figura 2.1 se presentan los eventos en un motor de cuatro tiempos.

⁴ Deborah, L. Energy for Motor Vehicles

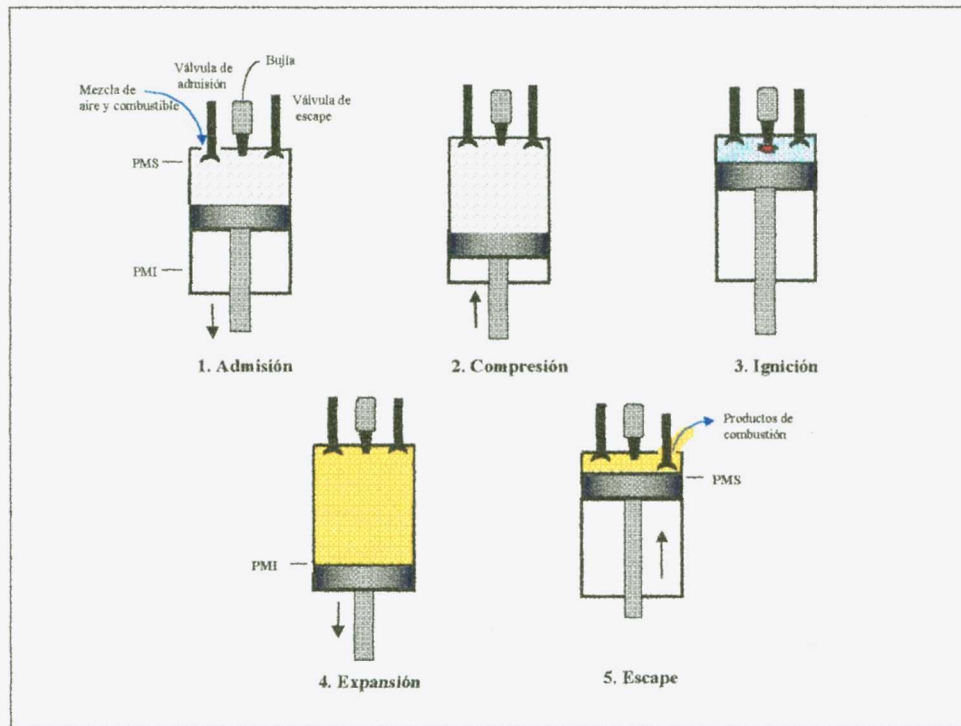


Figura 2.1 Funcionamiento de un motor de combustión interna de cuatro tiempos con ignición por chispa.

En la etapa de admisión (1) entra al cilindro la mezcla de aire y combustible mientras el pistón baja hacia el punto muerto inferior (PMI), se cierra la válvula de admisión y comienza la carrera de compresión (2) al subir nuevamente el pistón, cerca del punto muerto superior (PMS) salta la chispa en la bujía (3) provocando la detonación de la mezcla y con el súbito aumento en la presión de los gases encerrados en el cilindro inicia la carrera de potencia (4) al empujar el pistón hacia atrás. Finalmente (5) se abre la válvula de escape permitiendo que los gases salgan del cilindro mientras el pistón vuelve a subir y se repite el ciclo.

El ciclo Otto está formado por cuatro procesos reversibles que se muestran en la figura 2.2, siendo estos:

- 1-2 Compresión adiabática reversible (isoentrópica)
- 2-3 Adición de calor a volumen constante (compresión)
- 3-4 Expansión adiabática reversible (isoentrópica)
- 4-1 Rechazo de calor (expansión) a volumen constante.

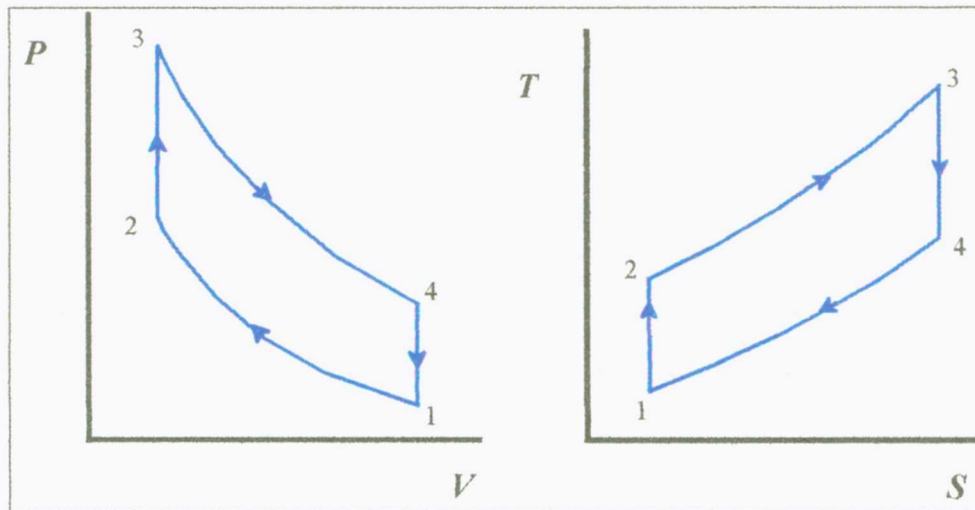


Figura 2.2- Diagramas P-V y T-S que muestran los procesos del ciclo Otto

En el proceso 2-3 el calor añadido proviene de una fuente externa de acuerdo con el ciclo con aire estándar, pero en la realidad el calor proviene de la energía liberada durante la reacción entre el combustible y el oxígeno del aire.

El trabajo neto producido por el ciclo y su eficiencia térmica se pueden calcular mediante las ecuaciones:

$$W = Q_A - Q_R$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_R}{Q_A}$$

Los valores del calor añadido (Q_A) y rechazado (Q_R) se obtienen aplicando la primera ley de la termodinámica:

$$Q + W = \Delta u \quad \text{Como } V = \text{constante, } W = 0$$

$$Q_A = u_3 - u_2 \quad (u_3 > u_2)$$

$$Q_R = u_4 - u_1 \quad (u_4 > u_1)$$

Por lo que $W = (u_3 - u_2) - (u_4 - u_1)$ y $\eta = 1 - \frac{u_4 - u_1}{u_3 - u_2}$

Para el ciclo con aire normal y considerando que la capacidad calorífica permanece constante durante los cuatro procesos, la eficiencia térmica se puede escribir como

$$\eta = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

Se puede recomodar la expresión de la eficiencia de la siguiente manera:

$$\eta = 1 - \left(\frac{T_1}{T_2}\right) \cdot \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{\left(\frac{T_3}{T_1} - 1\right)}$$

De los procesos adiabáticos reversibles 1 - 2 y 4 - 3:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \quad \text{y} \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \quad \text{ya que } V_1 = V_4 \text{ y } V_2 = V_3$$

donde $k = Cp/Cv$

$$\therefore \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad \text{y} \quad \eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1}$$

Por lo que la eficiencia térmica es función de las temperaturas T_1 y T_2 y en consecuencia de la relación de compresión, ya que $T_1/T_2 = (V_2/V_1)^{k-1} = 1/r^{k-1}$

En la que r es la relación de compresión, definida como $r = V_1/V_2$

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}}$$

Esto implica que para aumentar la eficiencia térmica del motor conviene lograr la mayor relación de compresión posible y tener valores altos de k . Sin embargo se presentan ciertas limitantes, en el caso de los motores que utilizan gasolina, al aumentar la relación de compresión, también aumenta la temperatura de la mezcla en el pistón y si es demasiado alta, la mezcla detonará antes de tiempo (preignición). El límite práctico para los combustibles comunes es una relación de compresión de alrededor de 10.

Con el valor de k , no se puede hacer mucho, ya que es una propiedad del combustible, y la presencia de otras sustancias como el CO_2 tienden a disminuir este valor.

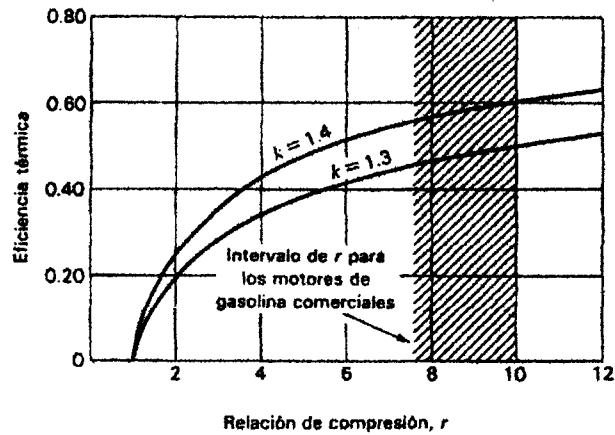
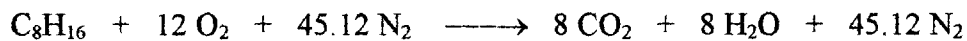


Figura 2.3 Eficiencia térmica del ciclo Otto con aire estándar en función de la relación de compresión r y la relación de capacidades caloríficas k .⁵

El combustible comúnmente utilizado en este tipo de motores es la gasolina la cual es una mezcla de hidrocarburos que tiene una fórmula química aproximada de C_8H_{16} , y la reacción de combustión con la cantidad estequiométrica de aire es:



La relación aire-combustible para esta reacción es $A/C = 14.77$

$$\frac{A}{C} = \frac{\text{masa de aire}}{\text{masa de combustible}} = \frac{n_a M_a}{n_c M_c} = \frac{(12 + 45.12)(28.97)}{(1)(112)} = 14.77 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg comb.}}$$

2.2. El ciclo Diesel

En el caso de los motores de combustión interna con ignición por compresión, sus procesos se estudian mediante el ciclo Diesel. que similarmente al ciclo Otto, es un ciclo idealizado. En la figura 2.4 se pueden observar las etapas que se dan en el funcionamiento de este tipo de motor.

⁵ Wark, Kenneth, TERMODINAMICA

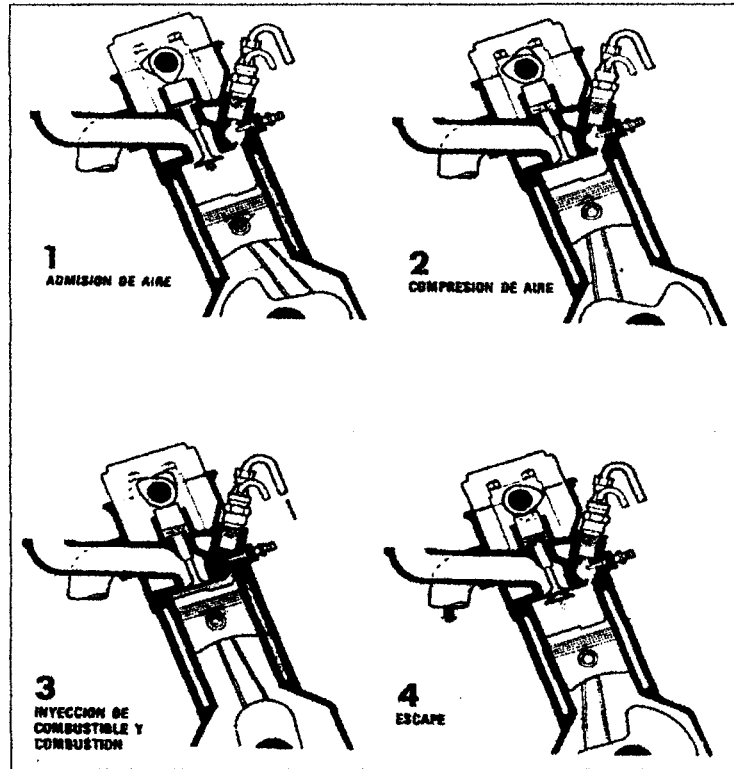


Figura 2.4.- Motor de combustión interna con ignición por compresión.

En la etapa de admisión (1) entra aire al cilindro mientras el pistón baja hacia el PMI. Se cierra la válvula de admisión y se inicia la etapa de compresión (2) mientras sube el pistón. Cerca del PMS se inyecta el combustible y debido a las altas relaciones de compresión, el aire alcanza una temperatura lo suficientemente alta para que se dé la ignición del combustible mientras éste ingresa al cilindro la presión aumenta y se da la carrera de potencia empujando el pistón hacia el PMI. Se abre la válvula de escape (4) y los gases se expulsan del cilindro mientras el pistón sube nuevamente hacia el PMS.⁶

El ciclo Diesel con aire normal consta de cuatro procesos reversibles tal y como se muestra en la figura 2.5. Los procesos que se llevan a cabo son:

- 1-2 Compresión adiabática reversible (isoentrópica)
- 2-3 Adición de calor a presión constante (compresión)
- 3-4 Expansión adiabática reversible (isoentrópica)
- 4-1 Rechazo de calor (expansión) a volumen constante

⁶ Figura obtenida de Granet, Irving. TERMODINAMICA, tercera edición

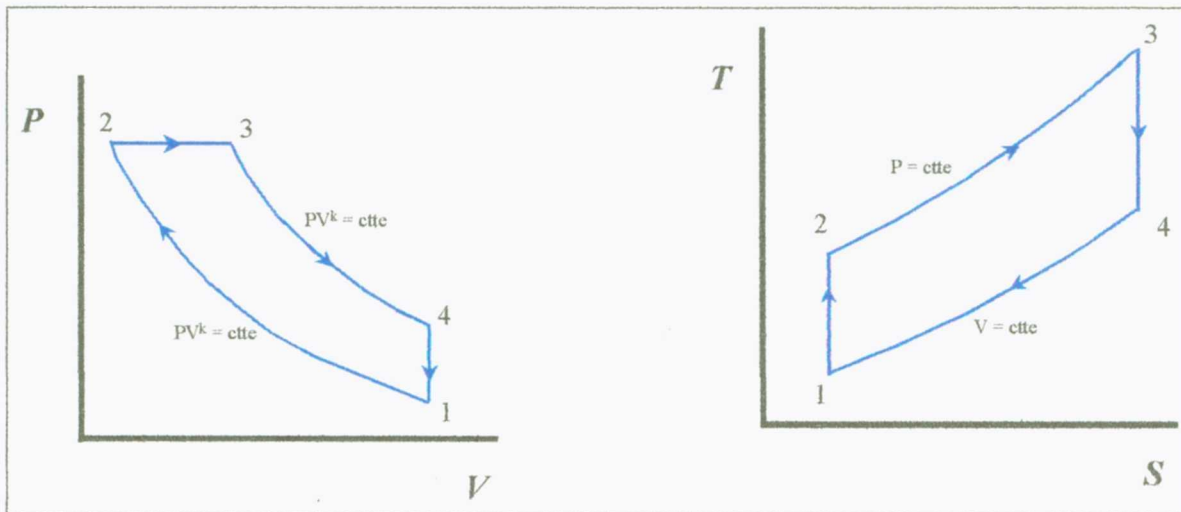


Figura 2.5- Procesos del ciclo Diesel en los diagramas P-V y T-S

En forma similar al ciclo Otto, el trabajo y la eficiencia térmica se pueden obtener de las ecuaciones

$$W = Q_A - Q_R$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_R}{Q_A}$$

Los valores del calor añadido (Q_A) y rechazado (Q_R) se obtienen aplicando la primera ley de la termodinámica:

$$Q + W = \Delta u$$

En el proceso de adición de calor la presión es constante por lo que $Q = \Delta h$, y en el de rechazo de calor que se lleva a cabo a volumen constante, $Q = \Delta u$

$$Q_A = h_3 - h_2 \quad (h_3 > h_2)$$

$$Q_R = u_4 - u_1 \quad (u_4 > u_1)$$

Por lo que $W = (h_3 - h_2) - (u_4 - u_1)$ y $\eta = 1 - \frac{u_4 - u_1}{h_3 - h_2}$

Para el ciclo con aire normal y considerando C_p y C_v constantes durante los cuatro procesos, la eficiencia térmica se puede escribir como

$$\eta = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{k(T_3 - T_2)}$$

Se define la relación de corte o relación de combustión, r_c , como el cociente del volumen final entre el volumen inicial durante el proceso de combustión. Esta nos da una idea del consumo de combustible, conforme r_c aumente, significa un incremento en el suministro de combustible.

$$r_c = V_3 / V_2$$

Utilizando esta definición en la ecuación de la eficiencia térmica se llega a la expresión

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right]$$

Como r_c siempre es mayor que 1 ya que $V_3 > V_2$, el término ente paréntesis de la derecha siempre será mayor a 1, por lo que para una misma relación de compresión, la eficiencia del ciclo Otto es mayor que en el Diesel. También se puede notar que al aumentar la relación de corte, la eficiencia del Diesel disminuirá, como se puede observar en la figura 2.6. De aquí se ve que los factores que habrá que tomar en cuenta si se quiere aumentar la eficiencia térmica son aumentar la relación de compresión y disminuir la relación de corte.

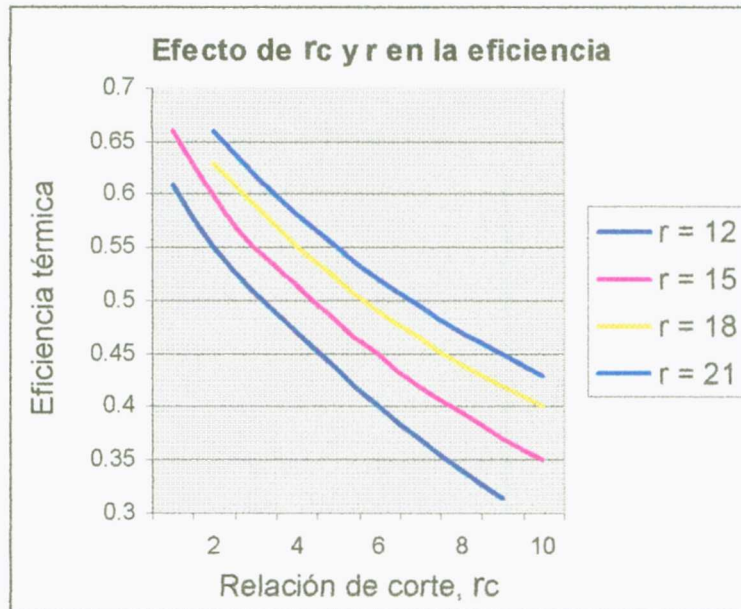


Figura 2.6.- Eficiencia térmica del ciclo Diesel en función de la relación de corte y la relación de compresión para un valor constante de k ($k=1.4$).

En el caso del motor de ignición por compresión, debido a su forma de operación, no se tiene limitante, en cuanto al problema de preignición del combustible, en valores altos de la relación de compresión ya que el combustible se inyecta directamente a la cámara de

combustión al final del proceso de compresión. De esta manera, la eficiencia térmica de estos motores se puede mejorar con mayores relaciones de compresión que en el Otto. De hecho, las limitantes a ésta serían de carácter mecánico.

El combustible comúnmente utilizado en este tipo de motores es el diesel, que tiene una fórmula química aproximada de $C_{12}H_{26}$. La reacción de combustión con la cantidad estequiométrica de aire es:



La relación aire-combustible para esta reacción es de $A/C = 15$

2.3. El ciclo Dual

Es un modelo intermedio entre los dos anteriores, consta de cinco procesos y se diferencian de los ciclo Otto y Diesel solamente en el proceso de adición de calor, el cual se lleva en dos etapas, primero a volumen constante seguido de uno a presión constante. Este modelo se ajusta un poco mejor a los procesos que se llevan a cabo en los motores de ignición por compresión. En la figura 2.7 se muestran los procesos que sigue este ciclo en los diagramas presión - volumen y temperatura - entropía.

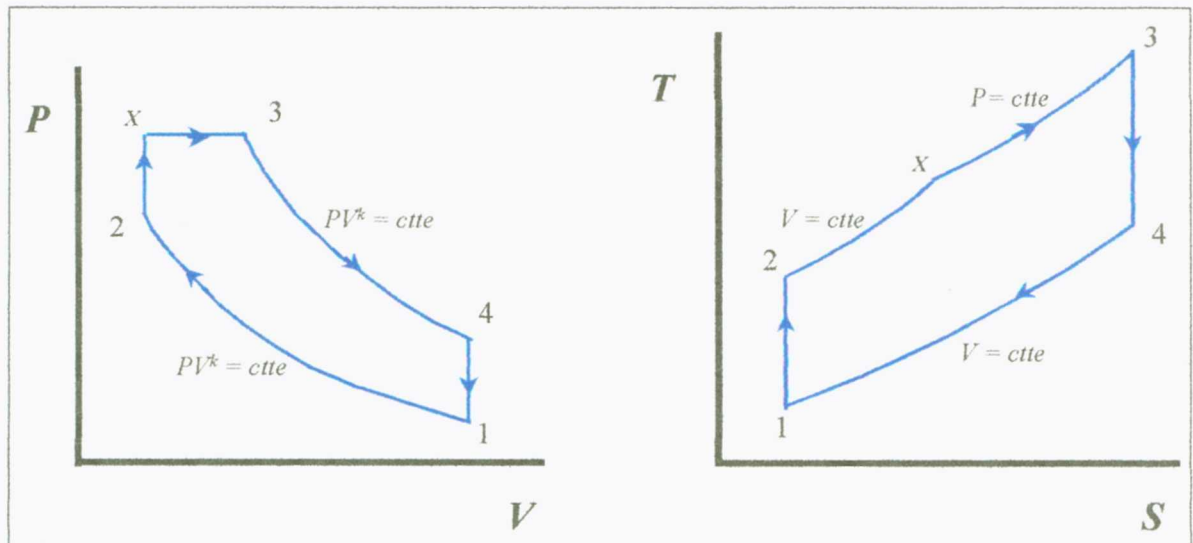


Figura 2.7.- Procesos que sigue el ciclo dual en los diagramas P-V y T-S

El calor añadido en este caso es en dos partes:

A volumen constante, $Q_V = u_x - u_2$

A presión constante, $Q_P = h_3 - h_x$

Por lo que el calor añadido total es la suma de los dos, $Q_A = Q_V + Q_P$

$$Q_A = (u_x - u_2) + (h_3 - h_x)$$

La eficiencia térmica para el ciclo dual es entonces:

$$\eta = 1 - \frac{u_4 - u_1}{(u_x - u_2) + (h_3 - h_x)}$$

Tomando Cp y Cv constantes:

$$\eta = 1 - \frac{C_V(T_4 - T_1)}{C_V(T_x - T_2) + C_P(T_3 - T_x)}$$

Reacomodando la expresión anterior se obtiene:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^k} \left[\frac{r_{p,V} \cdot r_c^k - 1}{k \cdot r_{p,V} (r_c - 1) + r_{p,V} - 1} \right]$$

Donde: r = relación de compresión = V_1/V_2

r_c = relación de corte = $V_3/V_x = V_3/V_2$

$r_{p,V}$ = relación de presiones durante la adición de calor a volumen constante.

$r_{p,V} = P_x/P_2 = P_3/P_2$

De la expresión para la eficiencia del ciclo dual se puede ver que:

Si $r_{p,V} \rightarrow 1$, $\eta_{dual} \rightarrow \eta_{Diesel}$

Si $r_{p,V} \rightarrow 1$ y $r_c \rightarrow 1$, $\eta_{dual} \rightarrow \eta_{Otto}$

Comparando los tres ciclos, se tiene que para la misma entrada de calor y misma relación de compresión:

$$\eta_{Otto} > \eta_{dual} > \eta_{Diesel}$$

Para la misma presión máxima y temperatura máxima:

$$\eta_{Diesel} > \eta_{dual} > \eta_{Otto}$$

Los motores que trabajan de acuerdo al ciclo Diesel, generalmente lo hacen con mayores relaciones de compresión (el de Otto o ignición por chispa tiene limitaciones por la pre-ignición) por lo que las eficiencias térmicas de un motor real de encendido por compresión no resultan muy diferentes a las de uno de encendido por chispa.

2.4 Contaminantes relacionados con los motores de combustión interna.

Durante el funcionamiento de los motores de combustión interna, se produce una cierta cantidad de sustancias químicas que son emitidas a la atmósfera, la mayoría de ellas contaminantes. Algunas son productos de la combustión que salen por el escape y otras provienen de fugas entre empaques y juntas, sobre todo cuando se encuentran en mal estado, incluso por descuidos como no disponer de la tapa del tanque de gasolina⁷. Una vez en la atmósfera, estas sustancias promueven la formación de otras más. Se ha determinado que tales sustancias contribuyen o causan enfermedades respiratorias como bronquitis, enfisema pulmonar, fibrosis pulmonar y asma⁸.

Entre las principales sustancias contaminantes emitidas durante la operación de los motores de combustión interna se encuentran los compuestos orgánicos volátiles, los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono, partículas sólidas, bióxido de carbono y en menor proporción plomo y óxidos de azufre. En la figura 2.8 se indican las partes del automóvil donde se dan normalmente las emisiones de sustancias contaminantes.

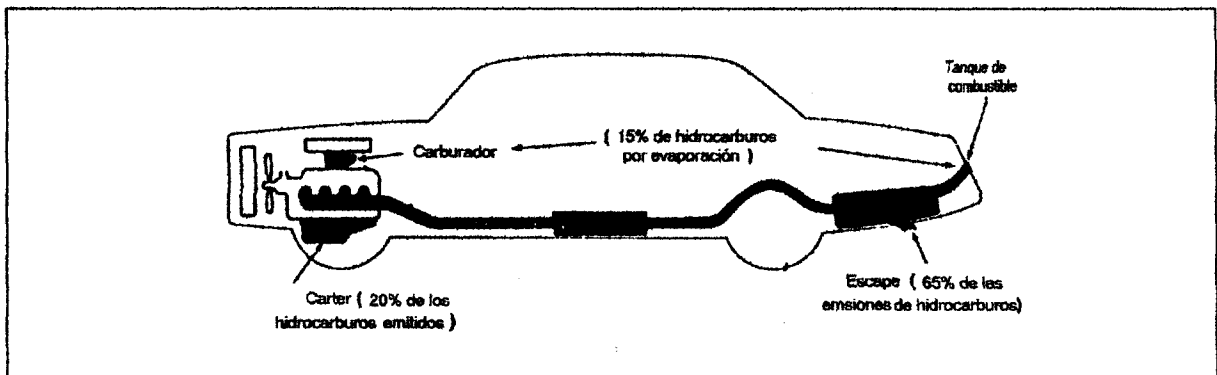


Figura 2.8- Fuentes potenciales de emisión de contaminantes de un automóvil que no cuenta con dispositivos de control.

⁷ Emissions - How are They Formad? Web

⁸ Emissions - What are they and Why are They Harmful?. Web

De los contaminantes en la atmósfera en los países industrializados occidentales y Japón, cerca de la mitad de los óxidos de nitrógeno, dos tercios del monóxido de carbono y casi la mitad de los hidrocarburos son aportados por los motores de vehículos de transporte⁹.

El motor de combustión con ignición por chispa produce bajas emisiones si se encuentra bien afinado. Una parte significativa de sus emisiones se generan durante el arranque y calentamiento del motor ya que mientras se calienta requiere de una mezcla rica, propiciando que los gases de escape contengan altas concentraciones de hidrocarburos sin quemar y monóxido de carbono debido a una combustión incompleta. Una vez que alcanza la temperatura de operación, las emisiones son relativamente bajas debido a un buen control de la mezcla aire - combustible y el funcionamiento adecuado del convertidor catalítico.

El tipo de sustancias emitidas en el escape del automóvil varía de acuerdo a la relación aire-combustible (A/C) tal y como se puede ver en la figura 2.9. Una mezcla rica implica deficiencia de aire durante la combustión, propiciando como ya se comentó que la combustión sea incompleta y se tengan altas emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono, mientras que una mezcla pobre, que implica un exceso de aire, debido a la presencia de oxígeno promueve la formación de óxidos de nitrógeno (NOx) y ayuda en la disminución de emisión de hidrocarburos y CO.

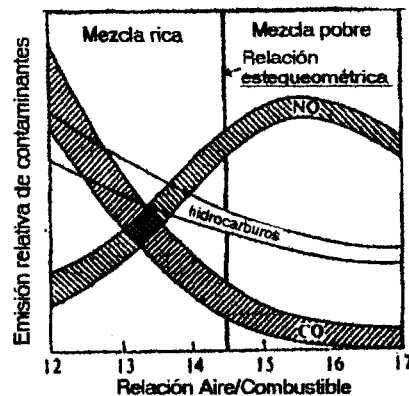


Figura 2.9.- Emisión relativa de contaminantes por un motor de gasolina en función de la relación aire - combustible (A/C)¹⁰.

En el caso de los motores de ignición por compresión, las emisiones más importantes son de óxidos de nitrógeno que se generan por las altas temperaturas en el motor y mezclas pobres, y sobre todo partículas sólidas que se forman en exceso; cuando el motor se somete a grandes cargas, se inyecta más combustible y parte de éste no se quema provocando el

⁹ Deborah L, op. cit, pag 55

¹⁰ Manahan, S.E. Environmental Chemistry

característico humo negro de estos motores¹¹, también se ve favorecida la formación de partículas por las bajas temperaturas durante el proceso de combustión.

2.4.1. Compuestos orgánicos volátiles (COVs).

Los compuestos orgánicos volátiles son hidrocarburos provenientes de la evaporación del combustible y en el escape cuando por algún motivo no se queman durante el tiempo de combustión y que una vez que se encuentran en la atmósfera, permanecen el tiempo suficiente para participar en las reacciones fotoquímicas.

Las principales causas de estas emisiones son el enfriamiento de la flama cerca de las paredes de la cámara de combustión, combustible atrapado en ranuras y recovecos de la cámara, vapores del combustible que se absorben en el aceite durante la combustión y posteriormente son desorbidos, combustión incompleta debido a un exceso de gases recirculados, fallas en la ignición durante el tiempo de combustión y otras causas similares.

Todos los VOCs contribuyen en cierto grado al problema del smog urbano. En presencia de la luz ultravioleta proveniente del Sol reaccionan con los óxidos de nitrógeno (NOx) y los gases de la atmósfera produciendo ozono y smog fotoquímico. Algunos de estos compuestos están relacionados con problemas de salud que van desde irritación del sistema respiratorio hasta cáncer.

Los principales compuestos que forman los VOCs son aquellos que se evaporan rápidamente a temperatura ambiente y cuya presión vapor es mayor a 0.1 mmHg (13 Pa) a condiciones estándar (20 °C y 1 atmósfera).

El metano se encuentra en grandes proporciones en los hidrocarburos no quemados, pero debido a que es inerte (no participa en las reacciones fotoquímicas) no se clasifica como VOC. Además de los hidrocarburos superiores (etano, propano, etc.), también se consideran como VOCs los compuestos orgánicos oxigenados (aldehídos, cetonas), fenoles, alcoholes, nitrometano y ésteres) ya que son altamente reactivos.

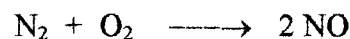
¹¹ Influence of Power Unit Choice, Design, and Operation Emissions. Web

2.4.2 Óxidos de nitrógeno (NOx)

Los óxidos de nitrógeno, básicamente NO y NO₂, se forman como resultado de las reacciones de combustión a altas temperaturas que se llevan a cabo dentro de los pistones durante el proceso de combustión en los motores de combustión interna. Los NOx contribuyen con la formación del smog fotoquímico. El NO₂ junto con el SO₂ y el vapor de agua bajo ciertas condiciones provocan la lluvia ácida.

Hay dos fuentes de generación de NOx durante los procesos de combustión. La primera es la oxidación del N₂ atmosférico debido a las altas temperaturas, se le denomina NOx térmico y la segunda fuente es la oxidación del nitrógeno contenido en los combustibles.

La producción de NO tiene que ver con la relación aire-combustible (A/C), el contenido de nitrógeno en la composición del combustible, la fracción de gases de los productos de combustión recirculados, los gases quemados residuales que permanecen en la cámara de combustión del ciclo previo y el tiempo del motor. La A/C es importante, ya que para que se forme una cantidad apreciable de NO, se requiere un exceso de oxígeno libre presente. La reacción primaria de producción térmica de NO es como sigue:



Habiendo exceso de oxígeno presente, la velocidad de formación de NO entonces depende de la temperatura. La producción de NO aumenta conforme la temperatura a que se lleva a cabo la combustión es mayor.

Tanto la fracción de gas reciclado y el tiempo de ignición son factores importantes en la temperatura en la cámara de combustión. Conforme aumenta la fracción de gas recirculado, la temperatura disminuye, dando como resultado una disminución en la formación de NO. También un retraso en el tiempo de avance trae consigo una menor temperatura en el cilindro.

El grado del contenido de nitrógeno en los combustibles varía considerablemente, encontrándose cantidades despreciables en el gas natural, cantidades significativas en los combustibles destilados y en proporciones mayores en los combustibles más pesados (carbón, aceite mineral, etc.) de 0.5 a 3% en peso de nitrógeno. La formación de NO por oxidación en los combustibles que lo contienen en su composición ocurre rápidamente y no se ve afectada por la temperatura de combustión. Mezclas pobres o cercanas a la estequiométrica favorecen alta producción de NO debido al oxígeno presente¹².

El NO₂ se produce en la flama, pero se reconvierte inmediatamente a NO de acuerdo con las siguientes reacciones:

¹² Seinfeld, J. Atmospheric Chemistry and Physics of AIR POLLUTION, pag 92-102

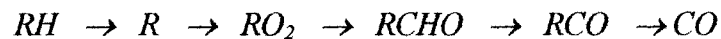


Las ecuaciones de equilibrio anteriores muestran que la cantidad de NO_2 producido es despreciable, a menos que se interrumpan antes de completarse. Esto puede ocurrir en los motores de ignición por chispa funcionando a bajas velocidades y cargas, y en los de ignición por compresión cuando se mantienen sin funcionar por periodos largos. En ambos casos, las temperaturas de flama son similares, pero los gases de los alrededores mucho más fríos, detienen las reacciones antes de completarse. Las bajas velocidades y cargas en los motores diesel provocan un incremento de la relación NO_2/NO_x de ser despreciable, hasta un 30%.

2.4.3. Monóxido de carbono, CO

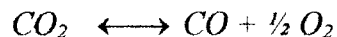
El monóxido de carbono es un gas inodoro e incoloro emitido por el escape de los autos que se produce principalmente como resultado de una combustión incompleta. Una concentración volumétrica de un 0.3% puede provocar la muerte gracias a la facilidad con que desplaza al oxígeno en la sangre al combinarse con la hemoglobina para formar carboxihemoglobina que interfiere con la capacidad de transporte del oxígeno. En menores concentraciones produce dolores de cabeza, mareos y nauseas¹³.

La formación de CO durante los procesos de combustión se da como un intermediario en la producción de CO_2 , de acuerdo con las siguientes reacciones:

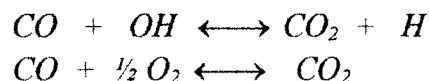


Donde R representa el radical alquilo del hidrocarburo.

También se produce CO por descomposición térmica del CO_2 , la cual se ve favorecida por altas temperaturas y mezclas ricas.



El CO_2 se produce a una velocidad más lenta de acuerdo con las reacciones de oxidación:



¹³ Emissions - What are they and Why are They Harmful?. Web

En mezclas ricas, la presencia de CO se debe principalmente a la combustión incompleta y es directamente proporcional a la relación aire-combustible. Conforme la A/C disminuye, la concentración de CO se incrementa. El CO se encuentra principalmente cuando hay mezclas ricas y en pequeñas concentraciones en mezclas pobres.

2.4.4. Partículas sólidas (PM)

Las partículas sólidas son pequeñas partículas arrojadas por el escape junto con los gases de la combustión como la ceniza o el hollín. Las que tienen diámetro menor a 10 micrómetros (PM10) son las que ponen en riesgo la salud debido a su potencial para depositarse y acumularse profundamente dentro de los pulmones una vez que son inhaladas.

En el motor de ignición por chispa, las PM se forman por tres causas principales: plomo, azufre y mezcla rica. En las gasolinas modernas, sin plomo y bajo contenido de azufre, su contribución en la emisión de las PM tanto del plomo como del azufre son insignificantes. En motores bien afinados, también es insignificante la emisión de PM.

En el caso de los motores de ignición por compresión (diesel), las emisiones de partículas son principalmente de hollín y hay tres mecanismos que controlan su emisión:

- se forma el hollín durante la primera fase de la combustión.
- se forma a partir del exceso de combustible en los gases quemados durante la segunda fase de la combustión.
- el hollín se oxida posteriormente al mezclarse en áreas ricas en oxígeno en la cámara de combustión.

Los niveles de producción de hollín también pueden verse afectados por otros factores como el tamaño de las gotas durante la inyección, ignición previa a la entrada de la cámara y depósitos sobre las paredes de la cámara.

2.4.5. Bióxido de carbono (CO₂)

El bióxido de carbono se produce siempre que se consumen combustibles que contienen carbono, aunque no es tóxico, existe una creciente preocupación debido al incremento en las cantidades de CO₂ en la atmósfera a nivel global, siendo este gas uno de los principales

responsables del llamado efecto invernadero o calentamiento global del planeta, lo cual está presionando a limitar el uso de combustibles de origen fósil.

Se estima que la contribución por los vehículos, que llegan a producir hasta 400 libras de CO₂ por tanque de gasolina¹⁴(Deborah et al, 1990), a las emisiones de CO₂ derivadas del uso de combustibles fósiles es de un 14%.

2.4.6. Plomo

El plomo proviene de las gasolinas a las que se les añade tetraetilo de plomo como antidetonante. Una parte se emite con las partículas en los gases de escape, las que se convierten en núcleos potenciales para que se formen gotas de agua y lo depositen en el agua o en el suelo. Otra parte del plomo queda adherido en el mofle y en el escape, que posteriormente, debido a la vibración se desprende depositándose en el suelo.

Se tiene documentado el aumento de la concentración de plomo en los mares desde su introducción como agente antidetonante en los motores de combustión interna, analizando el incremento de su concentración en el hielo polar. En la figura 2.10 se muestra gráficamente la tendencia creciente en el contenido de plomo en el hielo polar.

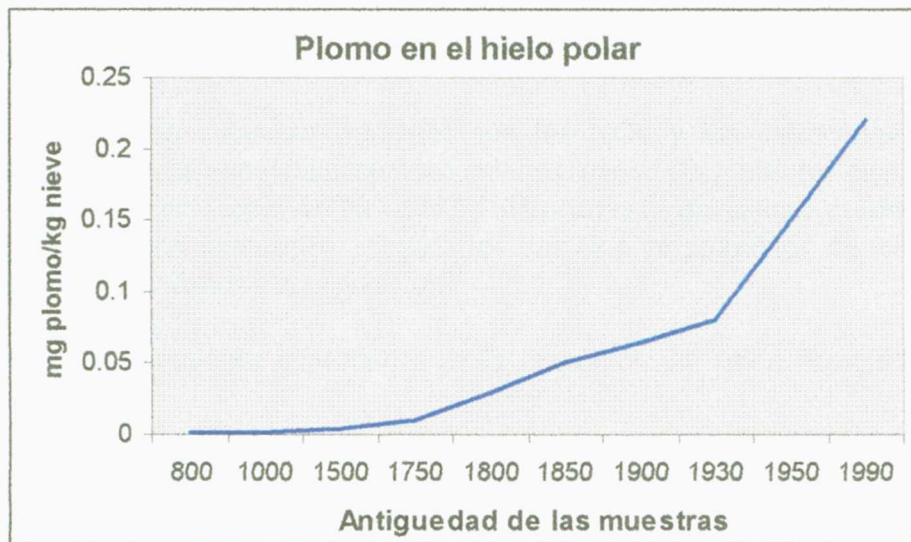


Figura 2.10 Incremento del contenido de plomo en el hielo polar¹⁵.

¹⁴ Deborah L. op. cit. pag 56,57

¹⁵ Stern, Arthur C. et al, Fundamentals of Air Pollution. pag 12

Mientras se encuentran en el aire, antes de ser removidas por sedimentación o lavadas por agua, las partículas con plomo pueden ingresar al organismo por inhalación. Una vez en los pulmones, el plomo pasa a la sangre depositándose en los huesos.

El plomo es tóxico al acumularse excesivamente en el organismo resultando en envenenamiento por plomo, con síntomas variados como son cólicos, parálisis muscular, daño al cerebro y eventualmente la muerte.

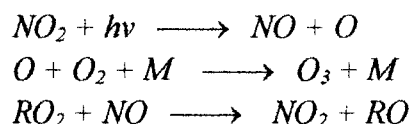
Actualmente en algunos países se prohíbe el uso de gasolina con plomo por motivos de salud pública. Los automóviles equipados con convertidor catalítico tampoco deben utilizar gasolinas con plomo ya que éste envenena los catalizadores utilizados en el convertidor dañándolos irreversiblemente¹⁶.

2.4.7. Smog fotoquímico.

Entre los problemas importantes de contaminación relacionados con el transporte vehicular urbano, se encuentra el del *smog* fotoquímico. *Smog* es un vocablo proveniente de la combinación de las palabras *smoke* y *fog* del inglés. Consiste en una mezcla de reactantes y productos debidos a la presencia de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno en la atmósfera expuestos a la radiación solar. La mayor parte de estos compuestos provienen de los motores de los vehículos. La formación del smog fotoquímico se ve favorecida en condiciones de altas temperaturas, sol brillante y baja humedad.

Los principales contaminantes primarios son los NO_x y los hidrocarburos que son convertidos rápidamente a contaminantes secundarios, ozono (O₃), nitratos orgánicos (PAN, peroxiacetil nitratos), oxidación del NO a NO₂, hidrocarburos oxidados y el llamado aerosol fotoquímico. Estos contaminantes secundarios son los responsables de efectos como irritación de los ojos y daños a la vegetación¹⁷.

Algunas de las reacciones importantes en la formación del smog fotoquímico son las siguientes:

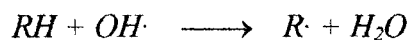


¹⁶ Stern Arthur C. op cit, pag 14 - 16

¹⁷ Seinfeld, op. cit pag. 6, 42

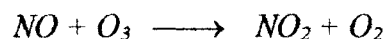
Donde R representa un radical alquil, M es una molécula que absorbe energía para estabilizar los productos formados (puede ser O₂ o N₂), *hν* es radiación ultravioleta con una longitud de onda entre 280 y 430 nm.

La generación de radicales peroxi RO₂ se da principalmente por el ataque de radicales hidroxilo (OH) a hidrocarburos (excepto el metano que no presenta este tipo de reacciones):



Y la formación de radicales OH· se da por otra serie de reacciones fotoquímicas de diferentes compuestos, ozono, H₂O, aldehídos (RCHO), etc.

La rapidez de generación de O₃ se puede relacionar con la producción de RO₂ y puede ser destruido por la reacción con NO, pero la reacción del NO con RO₂ es más rápida provocando que el ozono se acumule.



En ausencia de luz solar, la química entre los componentes de la atmósfera cambia, el O₃ disminuye, se produce NO₃ y N₂O₅ y en presencia de agua se forma HNO₃.

Los efectos dañinos provocados por el *smog* fotoquímico son variados. No se han establecido claramente los efectos del ozono, pero en general, a concentraciones de 1 ppm produce estrechamiento de los conductos pulmonares y se cree que acelera el envejecimiento de los pulmones debido a la oxidación de ciertos compuestos en las proteínas.

Un efecto notable es la irritación de los ojos. Los compuestos del *smog* fotoquímico que se han identificado como irritantes son el formaldehído (HCHO), la acroleína (CH₂CHCHO) y algunos compuestos de los nitratos como el de peroxiacetil (PAN)

La figura 2.11 muestra la complejidad de las interrelaciones entre las diferentes sustancias de la atmósfera y el *smog* fotoquímico.

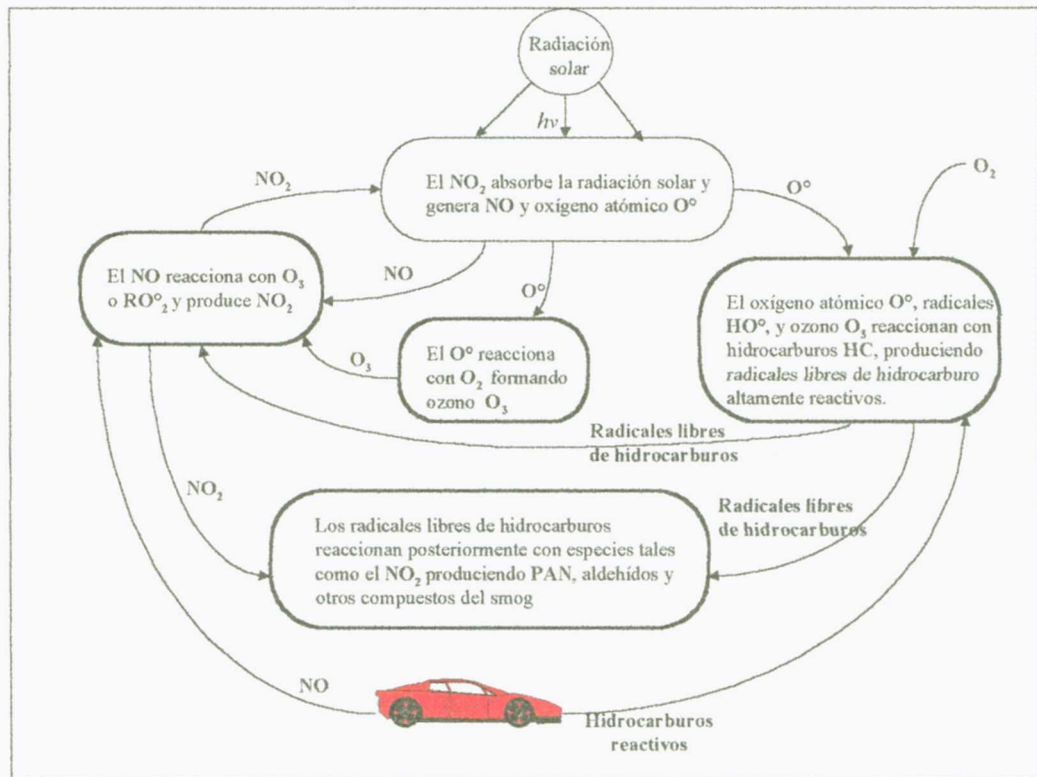


Figura 2.11.- Esquema general en la formación del smog fotoquímico.

2.5. Reducción de la contaminación en motores de combustión interna

Algunas alternativas para disminuir la contaminación producida por los motores de combustión interna incluyen: el uso de convertidor catalítico en los vehículos, el cambio a combustibles alternos, reformulación de las gasolinas, mejoras en el diseño que aumenten la eficiencia del vehículo o del motor, rediseño del sistema vial, disminución del peso del vehículo, la promoción del transporte masivo, etc.

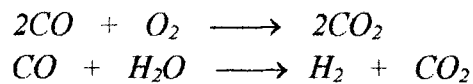
2.5.1. El convertidor catalítico

Se utiliza como medio de post-tratamiento de las emisiones, reduciendo los gases contaminantes. Está hecho con pequeñas cantidades de metales preciosos como platino, rodio y paladio distribuidos sobre una base de cerámica o de acero inoxidable. Se encuentra

ubicado entre el múltiple de escape y el mofle, tiene estructura en forma de panal para lograr la mayor área posible de contacto entre los gases de escape y la superficie del catalizador.

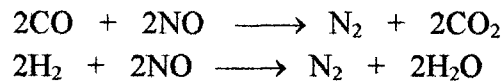
Al pasar los gases por el convertidor catalítico se llevan a cabo una serie de reacciones benéficas:

Oxidación del CO:



Oxidación de hidrocarburos: $C_xH_y + O_2 \longrightarrow H_2O + CO_2$

Reducción de NOx:



La eficiencia de conversión puede llegar hasta el 95% una vez que el convertidor alcanza su temperatura de operación (250 a 350°C). Sin embargo, del 60 al 80% de las emisiones de hidrocarburos y CO se dan durante los primeros minutos de operación del motor mientras se calienta el convertidor¹⁸.

Estudios realizados por la Sociedad de Ingeniería Automotriz de los Estados Unidos (SAE) para medir los efectos de la gasolina reformulada, señalan que los beneficios que se logran en vehículos equipados con convertidor catalítico de tres vías computarizado, consisten en reducir drásticamente las emisiones de hidrocarburos hasta 40 por ciento, monóxido de carbono hasta 22 por ciento y óxidos de nitrógeno hasta 17 por ciento, con respecto al nivel de contaminantes que emiten estos vehículos al usar una gasolina sin plomo no reformulada.

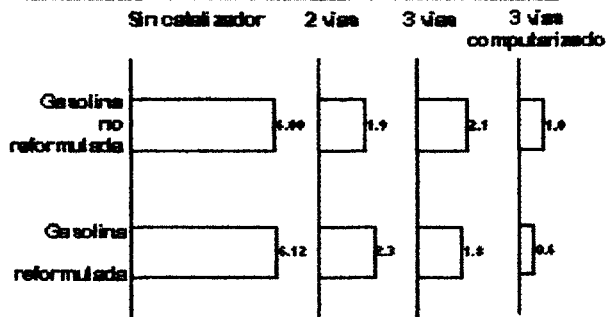
En la figura 2.12, que reporta PEMEX, se pueden observar los efectos en la disminución de emisiones por vehículos al utilizar el convertidor catalítico y gasolinas reformuladas¹⁹.

¹⁸ Emissions - After treatment Techniques. Web

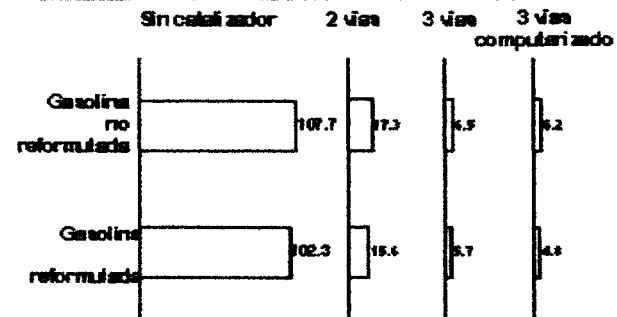
¹⁹ PEMEX, Web

Comparación de emisiones por tipo de gasolina sin plomo (gramos por kilómetro)

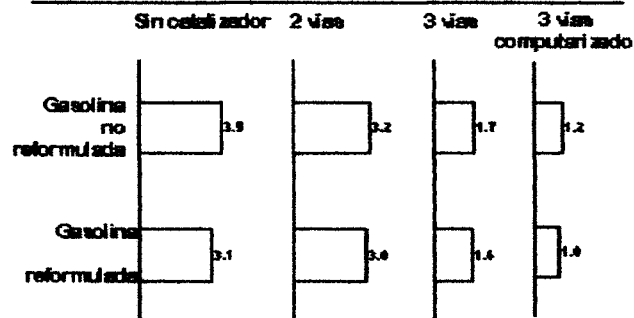
Hidrocarburos



Monóxido de carbono



Oxidos de Nitrógeno



Fuente: The Total Effect of a Reformulated Gasoline on Vehicle Emissions by Technology, SAE Technical Paper Nº 91 0380

Figura 2.12 Comparación de las emisiones de los automóviles con y sin convertidor catalítico, diferentes tipos de convertidores catalíticos y gasolina reformada y no reformada.

2.5.2. Combustibles alternos en vehículos

Entre los combustibles alternos para vehículos se encuentran el etanol, metanol, gas natural, gas L.P., hidrógeno, electricidad y cualquier otro que no provenga del petróleo. Se estima que si el 13% de los vehículos utilizan combustibles alternos para el año 2010 solamente en los Estados Unidos, se ahorrarán 3.5 cuatrillones (3.5×10^{15}) de energía en ese año. La mayoría de vehículos de combustible alternativo utilizan gas LP, gas natural comprimido y una mezcla de 85% de gasolina con 15% de metanol conocido como M85²⁰.

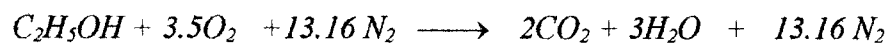
²⁰ Alternative Fuel Vehicles, DOE. Web

La decisión para implementar un combustible alternativo debe considerar entre otras cosas su costo y evitar en lo posible que durante su producción y combustión no aporten más CO₂ adicional a la atmósfera.

El **etanol** (C₂H₅OH) es el combustible derivado de la biomasa de mayor disponibilidad, puede obtenerse a partir del maíz o de la caña de azúcar pero su precio es mayor al de la gasolina. Las mejoras en eficiencia de conversión de biomasa a alcohol, etanol o metanol, podrían lograr que estos fueran económicamente atractivos. Uno de los problemas en su producción es la disponibilidad de tierras que podrían destinarse para la obtención del alcohol y podría significar el sacrificio de áreas de cultivos para alimentos²¹.

Otro derivado de la biomasa que puede utilizarse también como combustible es el alcohol metílico o **metanol** (CH₃OH). Puede obtenerse también a partir del gas natural, pero el ciclo completo de producción - consumo, genera más CO₂ que la combustión del gas natural.

Las reacciones de combustión con la cantidad estequiométrica de aire son:



Tanto el etanol como el metanol que son derivados de la biomasa, tienen la ventaja de no añadir CO₂ adicional a la atmósfera, ya que el CO₂ que producen durante su combustión es absorbido nuevamente durante el crecimiento de las plantas de donde es obtenido, formando así un ciclo de consumo y producción.

Tienen la ventaja de que ambos son energéticos renovables Actúan como receptores de la energía solar, la cual es transformada en materia orgánica mediante el proceso de la fotosíntesis, materia que posteriormente es convertida en los alcoholes mencionados.

De los combustibles fósiles, el **gas natural** es considerado el más limpio ambientalmente, esto debido a que está compuesto principalmente por gas metano (CH₄) que es prácticamente inerte en las reacciones implicadas en el smog fotoquímico, aunque es de los gases que contribuyen al efecto invernadero. Los vehículos que funcionan con gas natural emiten un 90% menos de CO, 60% menos de NO_x y un 85% menos de hidrocarburos reactivos comparados con los vehículos de gasolina, adicionalmente, emiten nada o casi nada de partículas cuando se comparan con vehículos diesel²².

²¹ Deborah L, op. cit, pag 58

²² The Environmental Impact of Natural Gas

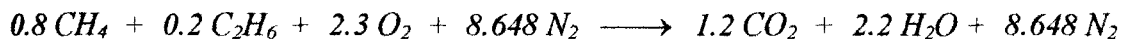
La energía contenida en el gas natural se puede obtener más eficientemente mediante su combustión que convirtiéndolo a metanol. Debido a que el metano es el componente que se encuentra en mayor proporción en el gas natural, su combustión produce un 20% menos de gases invernadero en términos de CO₂ equivalente que la gasolina. Sin embargo, tiene el inconveniente de tener una menor densidad energética y su almacenamiento a presión requiere de tanques robustos, limitando la capacidad de carga y recorrido del automóvil²³.

En estado líquido el gas natural (LNG, *liquid natural gas*) tiene una densidad energética un poco mayor comparada con otros combustibles alternativos limpios, sin embargo para un mismo recorrido se requieren 1.5 litros de LNG por litro de gasolina y 1.7 por litro de diesel.

El LNG es más barato que la gasolina y el diesel comparándolos sobre una base equivalente de energía y puede llegar a estar disponible en estaciones de suministro similares a las de gasolina y diesel.

A pesar de la concepción equivocada relativa a la seguridad en el uso de LNG, se ha demostrado que el uso de LNG como combustible vehicular no es más peligroso que la gasolina. Su temperatura de ignición es cerca de 260 °C mayor que la de la gasolina y para que se lleve a cabo la ignición en el aire, se requieren mezclas en el rango del 5% al 15%, y no detona en ambientes abiertos. En caso de derrames se disipa rápidamente²⁴.

Para un gas natural con composición 80% de metano y 20% de etano, la reacción estequiométrica por mol de combustibles es:



El hidrógeno es un combustible limpio, ya que en su combustión al combinarse con el oxígeno produce solamente agua y pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno. No produce CO₂, CO ni emite partículas sólidas, lo que lo hace el combustible ideal para utilizarse por los vehículos en las ciudades. Debido a su baja densidad es un buen candidato como combustible de aviones.



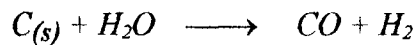
Tiene inconvenientes similares en cuanto a densidad energética y de almacenamiento al gas natural. La gravedad específica del hidrógeno es de aproximadamente 0.07, lo que significa que es menos denso que el metano, más ligero que el aire y que requiere un volumen de almacenamiento mucho mayor que el gas natural.

²³ Deborah L, op. cit, pag 59

²⁴ LNG Fact Sheet, web

También tiene una baja densidad de potencia, lo que limita la capacidad del vehículo para acelerar. El calor de combustión en base volumétrica del hidrógeno gaseoso es aproximadamente un tercio respecto al del gas natural ($12,000 \text{ kJ/m}^3$), mientras que en base másica es 2.75 veces que la mayoría de los hidrocarburos combustibles, en estado líquido, su densidad energética es 1000 veces mayor, pero requiere almacenarse a condiciones extremas de temperatura (20 K , $-253 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atm), cosa que no se logra con simplemente enfriar y comprimir el gas²⁵.

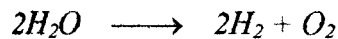
Desafortunadamente el hidrógeno no se encuentra puro en estado natural, sino combinado en muchas sustancias. Se puede producir mediante diversos procesos, como la reacción del carbón con vapor del que se obtiene el gas de agua:



También partiendo de metano vía la reacción de gas de agua



Otra manera de obtener el hidrógeno es mediante electrólisis.



Algunos aspectos negativos del hidrógeno como combustible son sus altos costos de producción, transportación, almacenamiento, seguridad y su aceptación pública. El hidrógeno es sumamente explosivo, más que el gas natural, puede explotar en el aire en concentraciones del 4 al 75%, además su energía de activación es muy pequeña, siendo suficiente una chispa provocada por electricidad estática²⁶.

Una de las tecnologías que pueden hacer atractivo el uso del hidrógeno son las celdas de combustión, las cuales transforman directamente la energía química del combustible en electricidad. Algunas empresas, como la Chrysler y la Mercedes Benz, ya han construido prototipos de automóviles que utilizan esta tecnología. El hidrógeno puede suministrarse directamente a la celda o puede obtenerse a partir de otros combustibles, como la gasolina o el metanol, mediante la evaporación de estos y su interacción con ciertos catalizadores que promueven la generación del hidrógeno. Los altos costos de la celda de combustión no han permitido su comercialización, pero se espera que alrededor del año 2005 los avances en tecnología permitan que el costo de este sistema sea comparable con los motores de combustión interna.

²⁵ Keating, E.L. *APPLIED COMBUSTION*. pag. 233 - 236

²⁶ Energy Storage. Web

2.5.3. El automóvil eléctrico.

El automóvil eléctrico se ha propuesto como solución a los graves problemas de contaminación atmosférica que se da en las grandes ciudades debido a la gran cantidad de gases emitidos por los motores de combustión interna de los medios de transporte. Por sus características, es el medio de transporte más limpio ya que no emiten contaminantes a la atmósfera (localmente), operan silenciosamente, no consumen combustible (energía) mientras están parados (por ejemplo en un alto) y pueden recuperar algo de la energía que normalmente se pierde durante el frenado utilizando el motor como generador, proceso conocido como frenado regenerativo²⁷, mediante éste se puede lograr hasta un 15% más en su capacidad de recorrido. El suministro de energía lo obtienen de baterías o acumuladores que proporcionan corriente directa.

Tienen la desventaja de disponer de una baja densidad de energía y un periodo muy largo para recargar las baterías. Su uso podría quedar confinado solamente a lugares donde no haya que recorrer grandes distancias y no se requiera un rápido abastecimiento de energía. A pesar del rendimiento muy superior del motor eléctrico, la capacidad para almacenar energía del tanque de gasolina de un automóvil convencional supera en unas cincuenta veces la de una batería de plomo libre de mantenimiento. Si se comparan pesos, este factor se encuentra en el orden de cien²⁸.

El hecho de que los carros eléctricos no emitan contaminantes no significa que no los haya. En algún lugar se estará generando la energía eléctrica que requieren estos, lo que sucede es que la emisión de contaminantes se habrá desplazado a otra localidad. A pesar de que la obtención de energía se realice mediante una planta termoeléctrica que consume combustibles fósiles, el proceso de generación, transformación, transmisión, etc. de la energía eléctrica hasta que se utiliza por el carro, puede llegar a emitir una cantidad menor de contaminantes que los que se hubiera emitido utilizando autos con motor de combustión interna. Por otro lado, si se genera la energía eléctrica mediante otros tipos de tecnologías, eólica, fotovoltaica, hidroeléctrica, etc., podría entonces representar una ventaja aún mayor en la disminución de contaminantes y ahorro de energéticos.

La comparación de las emisiones con la composición de las diferentes energías primarias utilizadas en Alemania - desde el lignito hasta la hidráulica - demuestra que el automóvil eléctrico (por sí mismos no producen ningún tipo de emisión) sólo produce el 10% de las emisiones que generan los automóviles con motores diesel o a gasolina, esto se puede ver en la tabla 2.1²⁹. Respecto a la mayoría de los contaminantes se nota una notable mejoría en la disminución de emisiones, algo para el CO₂ y ninguna para el SO₂ el que como ya se ha mencionado, es responsable entre otros factores adversos, de la lluvia ácida.

²⁷ Deborah L, op. cit, pag 58

²⁸ Harbauer, W., Modernos sistemas de accionamiento para automóviles eléctricos. pag 26.

²⁹ Harbauer, W. op. cit. pag 26, 27

Tipo de emisión	Autos Diesel / gasolina	Automóvil eléctrico
CO ₂	0.25 kg/km	0.21 kg/km
CO	1250 mg/km	55 mg/km
CH	300 mg/km	150 mg/km
NO _x	1530 mg/km	150 mg/km
SO ₂	220 mg/km	220 mg/km
Partículas	170 mg/km	150 mg/km

Tabla 2.1 Comparación de emisiones en Alemania de los automóviles diesel y a gasolina contra las emisiones asociadas al automóvil eléctrico (se consideran las emisiones producidas por las centrales eléctricas)

Como ejemplo, en marzo de 1997 la General Motors ha puesto en el mercado el carro eléctrico EV1, que utiliza baterías de plomo-ácido, con una capacidad de 16.2 kW·h de energía (58,320 kJ) que le permiten un recorrido de aproximadamente 130 km. Se recargan en un período de 3 a 4 horas si se utiliza una toma de corriente de 220 volts y hasta 15 horas con una toma de 110 volts. El costo de este auto es de \$34,000 US dls, más el costo del cargador, \$2,000 US dls y reemplazo de las baterías aproximadamente cada 3 años. Una vez desechadas las baterías, pueden ser recicladas. La carga completa de las baterías tienen un costo aproximado de \$1.00 a \$1.25 US dls, dependiendo de las cuotas de la zona y el horario en que se realiza la carga³⁰.

De acuerdo con modelos de simulación, se estima que el uso de carros eléctricos disminuiría casi totalmente la mayoría de los contaminantes de las zonas urbanas. Sin embargo, la contaminación producida por las plantas termoeléctricas podría en algunos casos ser contraproducente para algunos de los contaminantes, manteniendo una contaminación similar o incluso superior, especialmente en países como el Reino Unido y los Estados Unidos de Norteamérica según se muestra en la tabla 2.2³¹.

	HC's	CO	NO _x	SO _x	Partículas
Francia	-99	-99	-91	-58	-59
Alemania	-98	-99	-66	+96	-96
Japón	-99	-99	-66	-40	+10
Reino Unido	-98	-99	-34	+407	+165
U.S.A.	-96	-99	-67	+203	+122
California	-96	-97	-75	-24	+15

Tabla 2.2.- Reducción de contaminantes por automóviles eléctricos. Porcentaje en cambio de emisiones

³⁰ The first new kind of car, web

³¹ Electric Vehicles Reduce Pollution, web

Una variante es el **carro híbrido**, el cual cuenta con dos fuentes de energía motriz, un motor de gasolina y un motor eléctrico o alguna otra combinación que puede incluir una celda de combustión o motor de gas.

Entre las ventajas de los carros híbridos se encuentran: el frenado regenerativo; reducción en el peso al diseñar la máquina para la carga promedio y no la carga máxima; la eficiencia de consumo de combustible se aumenta mientras que las emisiones se disminuyen; pueden ser operados con combustibles alternativos, no dependen de los combustibles fósiles³².

La Volkswagen ha diseñado un carro híbrido de prueba, su motor es diesel y el motor eléctrico es alimentado por una batería de sulfuro de sodio. Tiene un clutch que hace la función de pasar del motor diesel al eléctrico y viceversa. Cuando el pedal del acelerador se presiona hasta un tercio o menos (como es el caso del tránsito típico en la ciudad), el motor eléctrico impulsa el carro. Una mayor presión en el pedal acciona el clutch que a su vez pone en operación el motor de gasolina y entonces el motor eléctrico funciona como regenerador. En un viaje combinado ciudad - carretera de 100 millas, se consume un galón de diesel y 25 kW-h de electricidad³³.

2.6. Análisis comparativo de las alternativas para motores de combustión interna

Para comparar los combustibles alternos, se dividieron las características en dos categorías: aquellas inherentes al combustible (eficiencia térmica, densidad de energía, emisiones, reactividad) y aquellas que se relacionan a la viabilidad de que sea masiva la utilización del mismo (disponibilidad, costo, almacenamiento, seguridad).

Características inherentes:

- Densidad de energía efectiva
- Emisiones de gases contaminantes: CO₂, CO y NO.
- Reactividad de los hidrocarburos del combustible.

Viabilidad:

- Costo.
- Almacenamiento
- Disponibilidad
- Renovabilidad

³² Hybrid Electric Vehicle Program, web

³³ Deborah, L. op. cit. pag 59

2.6.1 Características inherentes

Desde el punto de vista termodinámico, el criterio para decidir por un motor de combustión interna, se basa en aquel que nos dé la mayor eficiencia térmica, criterio muy válido ya que el tener una mayor eficiencia térmica representa un menor consumo de energéticos para una misma salida de potencia y en consecuencia los costos en consumo de combustibles disminuyen.

Actualmente el creciente problema de la contaminación del ambiente ha impulsado el estudio y desarrollo de alternativas que puedan suplir o mejorar el funcionamiento de los motores de combustión interna especialmente en lo que a emisiones se refiere. Por este motivo se hace un análisis en diferentes aspectos que permitan tener una mejor base de elección.

2.6.1.1 Eficiencia térmica y combustibles.

En cuanto a eficiencia térmica, se puede tomar la información que se reporta en diferentes fuentes. En este caso, con fines de comparación, se calculará de acuerdo con el ciclo termodinámico la máxima eficiencia térmica que puede lograrse por un motor de combustión interna. Es de esperarse que los resultados obtenidos con los cálculos teóricos se den proporcionalmente en la práctica.

La eficiencia térmica del ciclo Otto calculada con el ciclo de aire normal es

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad r = V_2 / V_1$$

Se busca la mayor r para lograr una mejor eficiencia térmica, pero hay que recordar que existe un límite a la relación de compresión y es el punto donde la temperatura dentro del cilindro es lo suficientemente alta para que la mezcla aire - combustible se encienda sin necesidad de la chispa. Como el proceso de compresión del ciclo Otto es isoentrópico, esta relación de volúmenes se puede obtener de las relaciones PVT para un gas ideal:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1}$$

La temperatura inicial, T_1 , será la temperatura a que entra la mezcla al cilindro, se tomará 300 K, y T_2 como la máxima temperatura alcanzada antes de la detonación y en este caso sería la temperatura de ignición del combustible que se utiliza.

Por ejemplo, para la gasolina con un número de octano de 92, su temperatura de ignición es de 390 °C³⁴, por lo que la relación de compresión máxima sería:

$$T_1 = 300 \text{ K}$$

$$T_2 = 390 + 273 = 663 \text{ K}$$

$$k \text{ del aire} = 1.4$$

$$r = \left(\frac{663}{300} \right)^{\frac{1}{1.4-1}} = 7.26 \text{ y } \eta = 1 - \frac{1}{(7.26)^{1.4-1}} = 0.5475$$

Que comparado este valor del 54.75% de eficiencia con el reportado en la tabla 1.1 para motores de gasolina del 18%, se tiene una diferencia bastante grande. Esto se debe a varios factores: el ciclo real no trabaja con aire solamente, también están presentes el combustible y los productos de combustión y en consecuencia, los valores de C_p y C_v no son constantes, en especial durante el proceso de combustión; otro factor son las irreversibilidades presentes durante los diferentes procesos y otro tipo de pérdidas mecánicas y de calor en el motor y sistema de transmisión.

Para otros combustibles se tienen los siguientes resultados:

Combustible	Temperatura de ignición (°C)*	Relación de compresión, r	Eficiencia térmica máxima, η (%)
Gasolina, 92 octano	390	7.26	54.8
Gasolina, 100 octano	429	8.376	57.3
Etanol	392	7.44	55.2
Metanol	470	9.82	59.9
Hidrógeno	574	13.62	64.8
Gas natural	650	16.6	67.5
Gas LP	441	8.738	58.0

Tabla 2.3 Eficiencia máxima teórica para un motor que funciona de acuerdo al ciclo Otto y diferentes combustibles.

* Tomadas de Perry, John H. Manual del Ingeniero Químico, tabla 19 sección 22. Para el gas LP se utiliza el menor valor de temperatura de ignición entre el propano y el butano.

En la figura 2.13 se comparan gráficamente las eficiencias térmicas teóricas máximas que se podrían alcanzar utilizando los combustibles indicados en la tabla 2.3.

³⁴ Perry, John H. Manual Del Ingeniero Químico, tabla 19 sección 22.

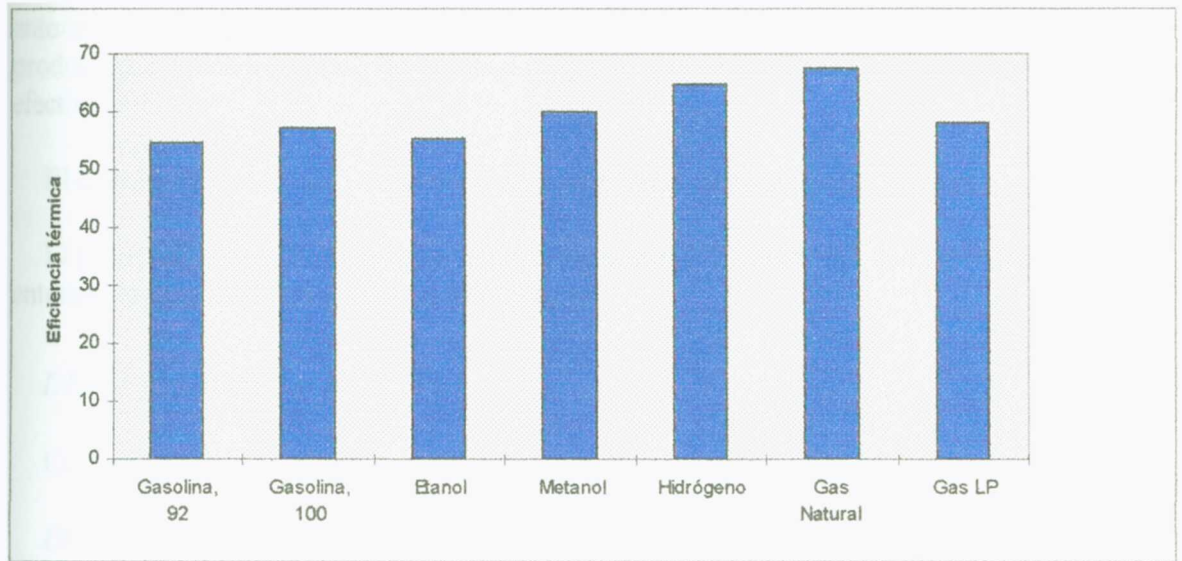


Figura 2.13 Eficiencia térmica teórica máxima para un motor de combustión interna que funciona de acuerdo con el ciclo Otto.

2.6.1.2 Densidad de energía.

El consumo de combustible para una potencia determinada entregada está relacionado directamente con la densidad de energía del combustible (DE). Se entiende por densidad de energía de un combustible a la energía que éste libera en forma de calor durante su combustión por unidad de masa de combustible, se puede expresar en kJ/kg o en kW-h/kg. Este valor equivale al poder calorífico de los combustibles, datos que se pueden obtener de las tablas de propiedades termodinámicas en la literatura. Se tomará como base el poder calorífico inferior, ya que a las condiciones de temperatura y presión a que se lleva a cabo el proceso de combustión en un motor de combustión interna, el agua se encontrará en estado de vapor.

Mientras mayor densidad de energía tenga un combustible, el recorrido o potencia obtenida serán mayores por unidad de masa de combustible y si éste se encuentra en fase líquida o sólida requerirá menor capacidad de almacenamiento, es decir, el tamaño del tanque de almacén de combustible podrá ser de menores dimensiones. En el caso de un combustible que a condiciones atmosféricas es gaseoso, es necesario someterlo a altas presiones o incluso licuarlo para almacenarlo, haciendo necesario el uso de recipientes pesados y mayores medidas de seguridad.

La energía que se libera durante la combustión es en forma de energía térmica, de la cual posteriormente se convertirá el trabajo o potencia útiles. Lo que realmente interesará es

entonces, para un cierto combustible, la cantidad de potencia o trabajo útiles que puede producir por unidad de masa de combustible, a lo que se le denominará densidad de energía efectiva (DE_{ef} .)

El cálculo de la densidad de energía se puede hacer de la siguiente manera:

El poder calorífico(PCI) se reporta en kJ/kg y como $1 \text{ kW}\cdot\text{h} = (1 \text{ kJ/s})\cdot\text{h} = 3600 \text{ kJ}$, entonces la densidad de energía en kW-h/kg es

$$DE = PCI / 3600 \text{ en kW}\cdot\text{h} / \text{kg}$$

Como $\eta = W_{neto} / Q_A$ y $Q_A = PCI$, la densidad de energía efectiva queda

$$DE_{ef} = DE \times \eta \text{ en kW}\cdot\text{h} / \text{kg de combustible}$$

Por ejemplo, en el caso de la gasolina:

$$PCI = 47,392 \text{ kJ/kg} \quad \text{De la tabla 2.3, } \eta = 0.548$$

$$DE = (47,392 \text{ kJ/kg}) / (3600 \text{ kJ/kW}\cdot\text{h}) = 13.16 \text{ kW}\cdot\text{h} / \text{kg de gasolina}$$

$$DE_{ef} = 13.16 \times 0.548 = 7.214 \text{ kW}\cdot\text{h} / \text{kg}$$

Esto quiere decir, que de los 13.16 kW·h de energía térmica que produce el combustible, solamente 7.214 se convertirán en trabajo útil, los 5.946 kW·h restantes serán tirados al ambiente como calor de desecho.

En la tabla 2.4 se dan los valores de DE_{ef} calculados de igual manera que el ejemplo anterior para los diferentes combustibles.

Combustible	Poder calorífico inferior PCI (kJ/kg)	Densidad de energía, DE (kW·h/kg)	Densidad de energía efectiva, DE_{ef} (kW·h/kg)
Gasolina, 92 octano	47392	13.16	7.214
Gasolina, 100 octano	47392	13.16	7.54
Etanol	27742	7.71	4.256
Metanol	21110	5.86	3.51
Hidrógeno	120012	33.34	21.6
Gas natural	46000	12.78	8.63
Gas LP	45600	12.67	7.35

Tabla 2.4 Densidad energética para diferentes combustibles en un motor que funciona de acuerdo al ciclo Otto.

Valores de PCI tomados de Keating, Eugene L, op cit., tablas 4.1 y 10.1. Para el gas LP, datos proporcionados por la Cámara del Gas de Jalisco.

En la figura 2.14 se presenta en forma gráfica la densidad energética efectiva para los diferentes combustibles. Se puede notar que el hidrógeno supera por mucho a los demás combustibles en densidad de energía.

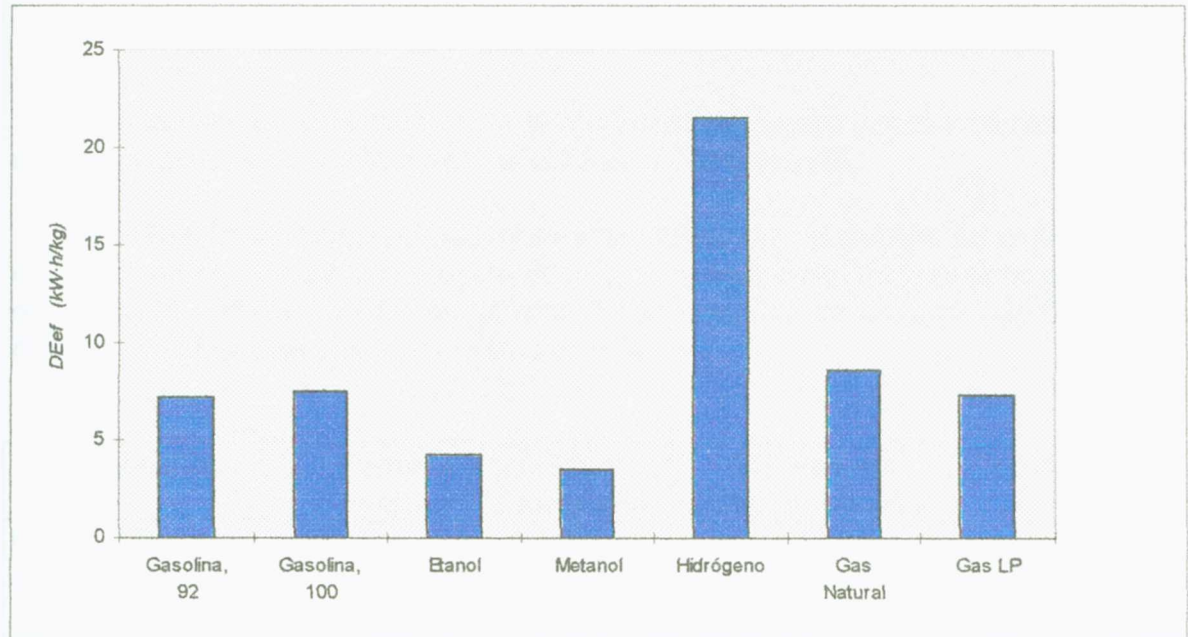


Figura 2.14 Densidad de energía efectiva teórica de diferentes combustibles en un motor que funciona de acuerdo al ciclo Otto.

Por ejemplo, para la gasolina de 92 de octano:

Fórmula química aproximada³⁵: C_8H_{16}

Masa molecular = $(8)(12) + (16)(1) = 112 \text{ kg/kgmol}$

Masa molecular del $CO_2 = 44 \text{ kg/kgmol}$

Por cada mol de gasolina, se producirán 8 moles de CO_2 , entonces

$$\frac{(8 \text{ kgmol})(44 \text{ kg / kgmol})}{(1 \text{ kgmol})(112 \text{ kg / kgmol})} = 3.123 \text{ kg } CO_2 / \text{kg gasolina}$$

El CO_2 emitido por $kW \cdot h$ de potencia entregada es entonces:

³⁵ Keating, E L. APPLIED COMBUSTION. Tabla 10.1 pag. 402

$$\frac{\text{kg } CO_2 / \text{kg comb.}}{DEef \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{kg comb.}} = \frac{3.123}{7.124} = 0.4384 \text{ kg } CO_2 / \text{kW} \cdot \text{h}$$

2.6.1.3 Emisiones de CO₂ en motores que funcionan de acuerdo al ciclo Otto.

Las emisiones de contaminantes a la atmósfera, se pueden obtener partiendo de las reacciones químicas de combustión y las condiciones de operación.

Para evaluar las emisiones de CO₂, se considerará que todo el carbono del combustible se convierte en CO₂, aunque una pequeña porción se convierte en CO, más tarde este CO se oxidará en la atmósfera a CO₂. En la tabla 2.5 se presentan las emisiones de CO₂ de los diferentes combustibles y en forma gráfica en la figura 2.15.

Combustible	Fórmula química	Masa molecular	CO ₂ emitido kg/kg combustible	CO ₂ emitido, kg/kW·h
Gasolina, 92 octano	C ₈ H ₁₆	112	3.123	0.438
Gasolina, 100 octano	C ₈ H ₁₆	112	3.123	0.414
Etanol	C ₂ H ₅ OH	46	1.913	0.45
Metanol	CH ₃ OH	32	1.375	0.3920
Hidrógeno	H ₂	2	0	0
Gas natural 85/15	CH ₄ +C ₂ H ₆	18.1	2.796	0.324
Gas LP 50/50	C ₃ H ₈ +C ₄ H ₁₀	51	3.02	0.411

Tabla 2.5 Emisiones de CO₂ por kW·h de potencia efectiva entregada para diferentes combustibles en un motor Otto.

La composición del gas natural es variable por lo que se utiliza una mezcla del 85 % de metano y 15 % de etano (85/15).

La composición del gas LP es variable, y se toma como referencia una mezcla de 50 % de propano y 50% de butano³⁶.

La masa molecular promedio de una mezcla gaseosa se calcula mediante la sumatoria de las fracciones mol multiplicadas por la masa molecular de cada componente:

³⁶ Información proporcionada por la Cámara del Gas

$$M_{mezcla} = \sum_{i=1}^n y_i M_i \quad y_i = \text{fracción mol del } i\text{-ésimo componente}$$

$$M_i = \text{Masa molécula del } i\text{-ésimo componente}$$

Para el gas natural, $M_{GN} = (0.85)(16) + (0.15)(30) = 18.1 \text{ kg / kg mol}$

En el caso del etanol y del metanol hay que recordar que si éstos provienen de la biomasa, el CO_2 que producen será removido de la atmósfera durante el crecimiento de la vegetación (caña, remolacha, etc.) de la cual se regenerarán posteriormente estos alcoholes. El hidrógeno, obviamente por no contener carbono en su estructura, no emite CO_2 .

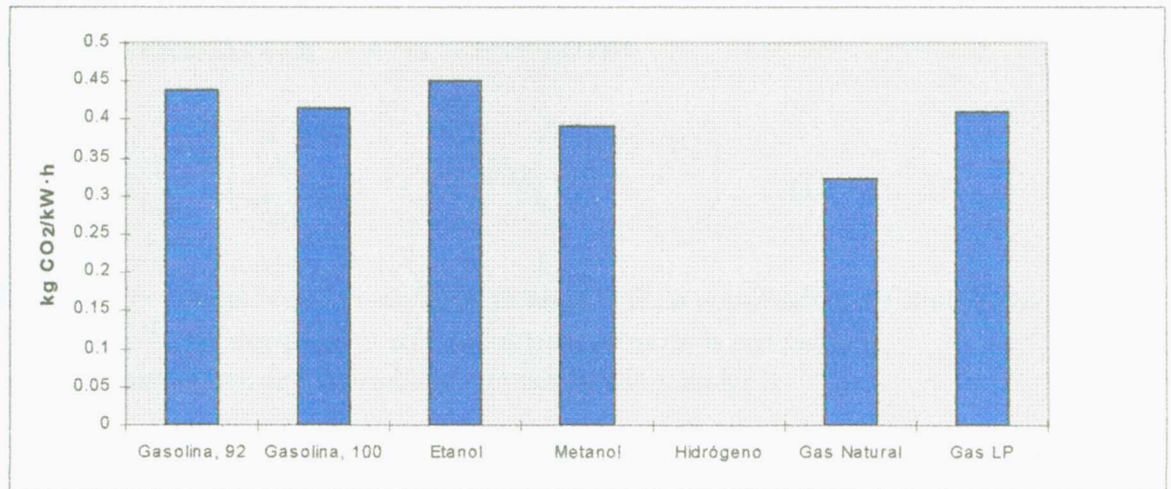


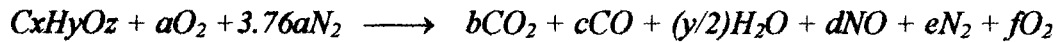
Figura 2.15 Comparación gráfica de emisiones de CO_2 para diferentes combustibles utilizados en un motor que sigue el ciclo Otto.

2.6.1.4 Formación térmica de CO y NO en motores que funcionan de acuerdo al ciclo Otto.

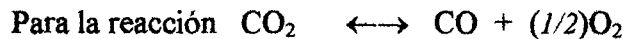
La formación de NO y CO durante la combustión se ven afectadas por diversos factores como la descomposición térmica del CO_2 a CO y O_2 y la reacción del N_2 con el O_2 para producir NO. Ambas reacciones se ven favorecidas por las altas temperaturas, es decir, conforme la temperatura de combustión aumenta, se producirán mayores cantidades de CO y de NO. Por otra parte, bajas relaciones aire-combustible (mezclas ricas) favorecen la formación de CO, pero no del NO debido a que existe poco oxígeno en la mezcla. En cambio, conforme aumenta la relación aire-combustible (mezcla pobre) aumenta la cantidad de oxígeno presente, favoreciendo la formación de NO y la desaparición de CO.

Para evaluar las emisiones de estas sustancias, se requiere conocer la temperatura a que se lleva a cabo la combustión y las relaciones de equilibrio de las reacciones químicas. Aunque la reacción de combustión dentro del cilindro del motor es tan rápida que no se alcanza el equilibrio, nos podemos dar una idea de la proporción en que diferentes combustibles producen térmicamente estos contaminantes y compararlos.

La reacción de combustión se puede generalizar de la siguiente forma:



Las relaciones de equilibrio son³⁷:

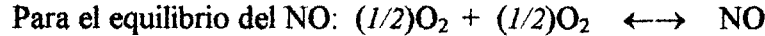


$$K_1 = \frac{n_{CO}n_{O_2}^{1/2}}{n_{CO_2}} \left(\frac{P_m}{n_m} \right)^{1/2} = 3 \times 10^4 \text{Exp} \left(-\frac{33719.2}{T_p} \right) \quad (1)$$

Donde P_m = presión de la mezcla de productos de la combustión, en atmósferas.

n_m = moles totales de la mezcla de los productos de la combustión.

T_p = temperatura de los productos de combustión, en K.



$$K_2 = \frac{n_{NO}}{n_{O_2}^{1/2} n_{N_2}^{1/2}} = 4.69 \text{Exp} \left(-\frac{10870.66}{T_p} \right) \quad (2)$$

La temperatura de los productos de combustión (T_p) se puede considerar como la máxima (adiabática) que se alcanza durante la ignición de la mezcla aire-combustible y se puede calcular mediante la primera ley de la termodinámica aplicada a sistemas reactivos, y en este caso en particular a volumen constante tal y como se modela el proceso de combustión en el ciclo Otto. La relación que aplica es:

$$\Delta H_R^\circ - (\Delta n_g)RT_o + \int_{298}^{T_p} \left(\sum_i n_i C_{v_i} \right) dT - \int_{298}^{T_R} \left(\sum_j n_j C_{v_j} \right) dT = 0 \quad (3)$$

Donde $\Delta H_R^\circ = \sum_P n_i \Delta h_{f_i}^\circ - \sum_R n_j \Delta h_{f_j}^\circ$ = Calor de reacción estándar

³⁷ Seinfeld, John H. Atmospheric Chemistry and Physics of AIR POLLUTION, pag. 78 - 81

Δh_f° = Calor de formación del compuesto i o j

$\Delta n_g = n_p - n_R$ gaseosos

T_R es la temperatura de los reactantes.

T_o es la temperatura a condiciones estándar = 298 K

R es la constante universal de los gases = 8.314 kJ/kg·K

C_v es la capacidad calorífica a volumen constante.

Los subíndices R y P se utilizan para denominar a los reactantes y productos respectivamente.

Los valores de los calores de formación estándar (Δh_f°) se pueden obtener de tablas.

Las C_v como función de la temperatura no se encuentran directamente en tablas termodinámicas, pero se pueden obtener a partir de valores de C_p de acuerdo a la relación $C_p = C_v + R$, es decir, $C_v = C_p - R$.

La temperatura de los reactantes (T_R) será a la que se encuentra la mezcla de aire y combustible antes de la ignición, es decir, para cada combustible corresponderá a la temperatura de ignición que se da en la tabla 2.3.

La presión de la mezcla de los productos (P_m) de la ecuación (1) se puede calcular mediante las relaciones PVT de los gases ideales y corresponde a la presión en el estado 3 de acuerdo con los procesos que sigue el ciclo Otto.

Para el proceso de compresión isentrópico 1-2 y considerando que la mezcla se comporta como aire, se tiene que:

$$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k \quad \text{de aquí que} \quad P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = P_1 \cdot r^k$$

Donde r es la relación de compresión $r = V_1/V_2$, valores que se tienen en la tabla 2.3, y k es la relación de capacidades caloríficas C_p/C_v . El valor típico de k para el aire es de 1.4 y se puede considerar constante durante la compresión isentrópica ya que el incremento de temperatura durante este proceso no es muy grande.

Para el proceso de combustión a volumen constante 2-3 y tomando $P_1 = 1$ atm:

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3} \quad \text{y} \quad P_3 = P_m = P_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right) = P_1 \cdot r^k \left(\frac{T_P}{T_R} \right) = r^k \left(\frac{T_P}{T_R} \right)$$

De esta manera, la ecuación (1) queda:

$$K_1 = \frac{n_{CO} n_{O_2}^{1/2}}{n_{CO_2}} \left(\frac{r^k T_P}{n_m T_R} \right)^{1/2} = 3 \times 10^4 \text{Exp} \left(-\frac{33719.2}{T_P} \right) \quad (4)$$

Se tienen hasta ahora tres ecuaciones y seis incógnitas (moles de CO₂, CO, NO, O₂, N₂ y la temperatura de los productos T_P), las tres ecuaciones restantes se obtiene de los balances de masa en la reacción de combustión:

Balance de carbono: $x = b + c$

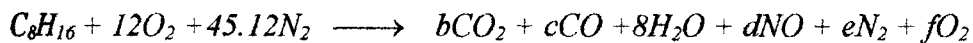
Balance de nitrógeno: $2(3.76a) = d + 2e$

Balance de oxígeno: $z + 2a = 2b + c + y/2 + 2f$

Se tiene un sistema de seis ecuaciones no lineales con seis incógnitas. Debido a que el sistema es no lineal, su solución requiere de algún método numérico. En este caso se ha decidido diseñar un programa de computadora que resuelva el sistema por un método iterativo y que se presenta en el anexo 1.

Los resultados que da el programa son los moles de productos y su temperatura en función del exceso de aire utilizado para la combustión. Tomando nuevamente el ejemplo de la combustión de la gasolina de octano 92 con la cantidad estequiométrica de aire:

La reacción de combustión es:



Con los balances de masa para el carbono y el nitrógeno se puede reducir el sistema de ecuaciones a cuatro:

$$c = b - 8 \quad \text{y} \quad e = 45.12 - d/2$$

y para el oxígeno:

$$f = 4 - (b + d)/2 \quad (A)$$

La ecuación para K₁ es:

$$K_1 = \frac{(8 - b)(f)^{1/2}}{b} \left[\frac{7.26^{1.4} \cdot T_P}{n_m \cdot 633} \right] = 3 \times 10^4 \text{Exp} \left(\frac{-33719.2}{T_P} \right)$$

$$\frac{(8-b)(f)^{\frac{1}{2}}}{b} \left(\frac{T_p}{n_m} \right) = 1.1836 \times 10^6 \text{Exp} \left(\frac{-33719.2}{T_p} \right) \quad (\text{B})$$

La ecuación para K_2 queda:

$$K_2 = \frac{d}{f^{\frac{1}{2}} \cdot \left(45.12 - \frac{d}{2} \right)^{\frac{1}{2}}} = 4.69 \text{Exp} \left(\frac{-10870.66}{T_p} \right) \quad (\text{C})$$

La cuarta ecuación se obtiene del balance de energía, ecuación (3), para la reacción de combustión y es función de los moles de productos y T_p . Cada uno de los términos se desglosa:

Los calores de formación estándar (Δh_f°) de productos y reactantes son:

Compuesto	Δh_f° , kJ/kg mol
C_8H_{16}	- 225184
CO_2	- 393520
CO	- 110530
H_2O	- 241820
NO	+ 90419
O_2	0
N_2	0

sustituyendo en la ecuación para el calor de reacción estándar

$$\Delta H_R^\circ = [-393520b - 241820(8) + 90419d - 110530(8-b)] - [-225184(1)]$$

$$\Delta H_R^\circ = -393520b + 90419d + 110530b - 2593616$$

$$\text{El término } (\Delta n_g)RT_o = \left[b + (8-b) + 8 + d + \left(45.12 - \frac{d}{2} \right) + f - 1 \right] (8.314)(298)$$

$$(\Delta n_g)RT_o = \left[\frac{d}{2} + f + 52.12 \right] (2477.572)$$

La integral para los productos:

$$\int_{298}^{T_p} \left[bCv_{\text{CO}_2} + (8-b)Cv_{\text{CO}} + 8Cv_{\text{H}_2\text{O}} + dCv_{\text{NO}} + \left(45.12 - \frac{d}{2} \right)Cv_{\text{N}_2} + fCv_{\text{O}_2} \right] dT$$

y la de los reactantes:

$$\int_{298}^{633} (Cv_{C_8H_{16}} + 45.12Cv_{N_2} + 12Cv_{O_2}) dT$$

Los valores de Cv se calculan de $Cv = Cp - R$, obteniendo Cp para cada uno de los compuestos del apéndice A.

La solución de este sistema de ecuaciones se realiza mediante el programa, y corriéndolo para diferentes porcentajes de exceso de aire se obtienen como resultados la temperatura máxima alcanzada durante la combustión y la composición en moles de los productos de la reacción.

Con fines de comparación se pueden expresar el CO y NO emitidos en g / kg de combustible, esto se logra mediante una relación sencilla utilizando las masas moleculares del CO = 28, el NO = 30 y en el caso de la de la gasolina = 112:

$$\frac{\text{grs CO}}{\text{kg } C_8H_{16}} = \frac{n_{CO}(\text{moles}) \cdot (28 \text{ gr/mol}) \cdot (1000 \text{ gr/kg})}{1(\text{mol}) \cdot (112 \text{ gr/mol})} = 250 \cdot n_{CO}$$

$$\frac{\text{grs NO}}{\text{kg } C_8H_{16}} = \frac{n_{NO}(\text{moles}) \cdot (30 \text{ gr/mol}) \cdot (1000 \text{ gr/kg})}{1(\text{mol}) \cdot (112 \text{ gr/mol})} = 267.857 \cdot n_{CO}$$

Debido a que cada combustible nos da diferentes rendimientos, es más conveniente comparar sus emisiones por unidad de potencia producida, lo que nos da la misma base de comparación que se ha estado utilizando en los demás parámetros, ya que para una misma potencia el consumo de combustible será diferente y en consecuencia la producción de contaminantes. Para lograrlo, solamente basta dividir los resultados que se obtuvieron por kg de combustible entre la densidad de energía efectiva ($DEef$), dando esto unidades en g/kW-h.

Los resultados obtenidos y las gráficas resultantes de estos se presentan en el anexo 1 enseguida del programa de cálculo. Los cálculos se realizaron de dos maneras, primero tomando los datos cuando el combustible se utiliza de manera más eficiente, es decir, en el ciclo se alcanza la máxima relación de compresión posible para cada combustible y su eficiencia térmica es la máxima posible. Esto implicaría el diseño o adaptación en cuanto a las dimensiones de los pistones de un motor en particular para cada combustible. La segunda manera fue considerando un mismo motor, de iguales dimensiones y por lo tanto la misma relación de compresión para todos los combustibles. En este último caso se toma como base el combustible que da la menor relación de compresión que es la gasolina de octano 92.

En la figura 2.16 se presenta como ejemplo una de las tantas gráficas que se obtuvieron para diferentes condiciones y da una idea de la formación de NO para diferentes combustibles.

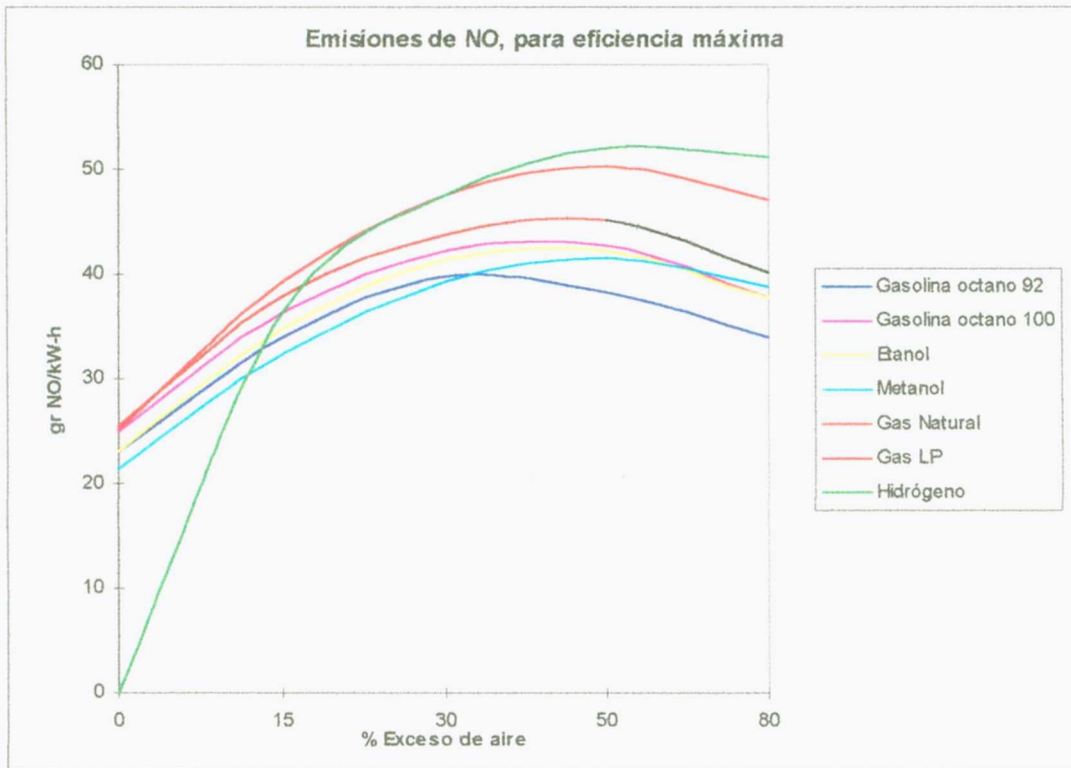


Figura 2.16 Formación térmica de NO para diferentes combustibles.

De las gráficas del anexo 1 y la figura 2.16 se puede ver que los combustibles que emiten mayores cantidades de NO (de origen térmico) en orden descendente son el hidrógeno, el gas natural, el gas LP, la gasolina de octano 100, el etanol, el metanol y la gasolina de octano 92. Este comportamiento se debe sobre todo a las temperaturas alcanzadas durante la combustión, ya que mientras más alta es ésta, la producción de NO como ya se mencionó se ve favorecida. En la figura 2.17 se puede ver que las temperaturas máximas alcanzadas concuerdan con los resultados obtenidos en cuanto a generación de NO.

A su vez, las temperaturas máximas se deben, por una parte al poder calorífico del combustible, ya que mientras mayor sea este, más energía desprende durante su combustión y como se está considerando que se lleva a cabo en forma adiabática, toda esta energía la absorben los gases productos de la reacción de combustión. En consecuencia, mientras mayor sea la cantidad de productos, se absorberá más energía y la temperatura resultante será menor y viceversa. Por este motivo, debido a que la cantidad en moles de productos de combustión para la gasolina superan por mucho a los del gas natural a pesar de que el poder calorífico de la gasolina es un poco mayor que el del gas natural (tabla 2.4), la temperatura alcanzada por el gas natural es mucho mayor. Con el hidrógeno es aún más notorio el

aumento en la temperatura de combustión por la pequeña cantidad de productos de combustión formados.

Estos resultados no concuerdan con la información que se encontró reportada para el gas natural y el gas LP en 2.5.2, información proveniente de fuentes del web, donde se mencionan emisiones de NOx mucho menores que cuando se utiliza gasolina. Esto nos lleva a dos posibilidades, una es que la diferencia en emisiones de NOx se debe a su formación debida al nitrógeno contenido en el combustible y la otra es que la información reportada por las referencias citadas no es correcta.

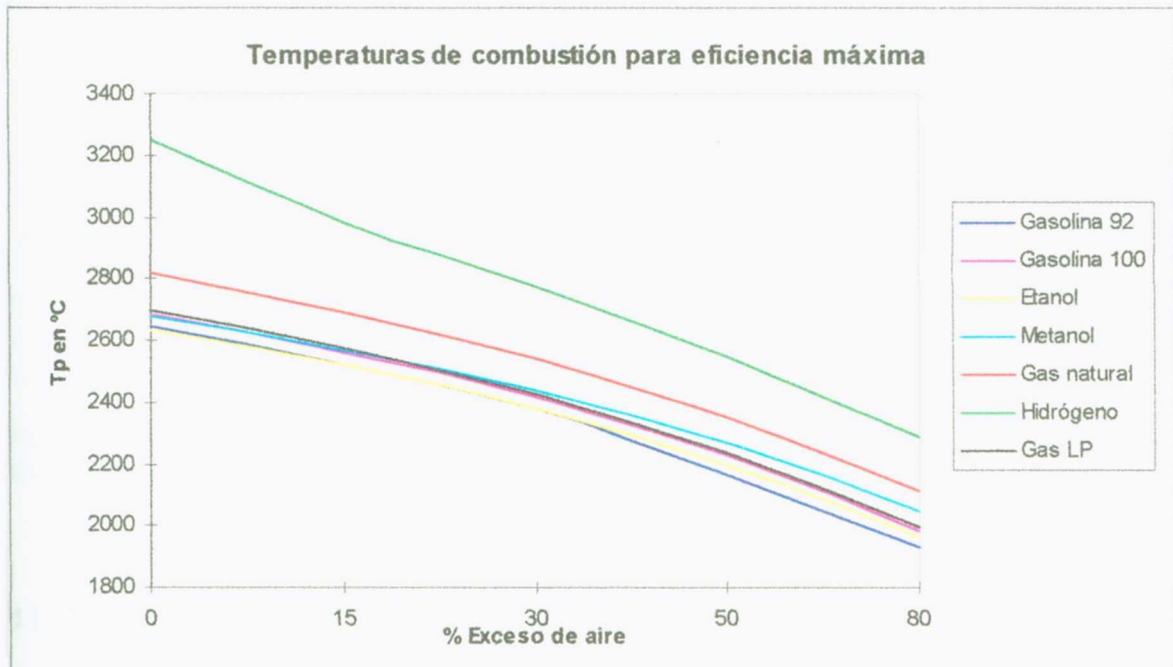


Figura 2.17 Temperatura de combustión máxima alcanzada por diferentes combustibles en un motor de combustión interna con ignición por chispa.

Desafortunadamente los resultados anteriores no reflejan la totalidad de NOx emitidos, ya que una parte importante de estos pueden provenir del nitrógeno contenido en los combustibles y aún no se han definido con precisión los mecanismos involucrados en su formación. Para ello habría que recurrir a la medición experimental o tomar los datos de otras fuentes de información.

Los resultados en cuanto a emisiones de CO tal y como se puede observar en las gráficas correspondientes del anexo 1 y la figura 2.18, aunque no hay mucha diferencia, éstos si concuerdan con los encontrados en las fuentes de consulta. Las mayores emisiones provienen de las gasolinas, seguidos por el etanol, el gas LP, el gas natural y el metanol.

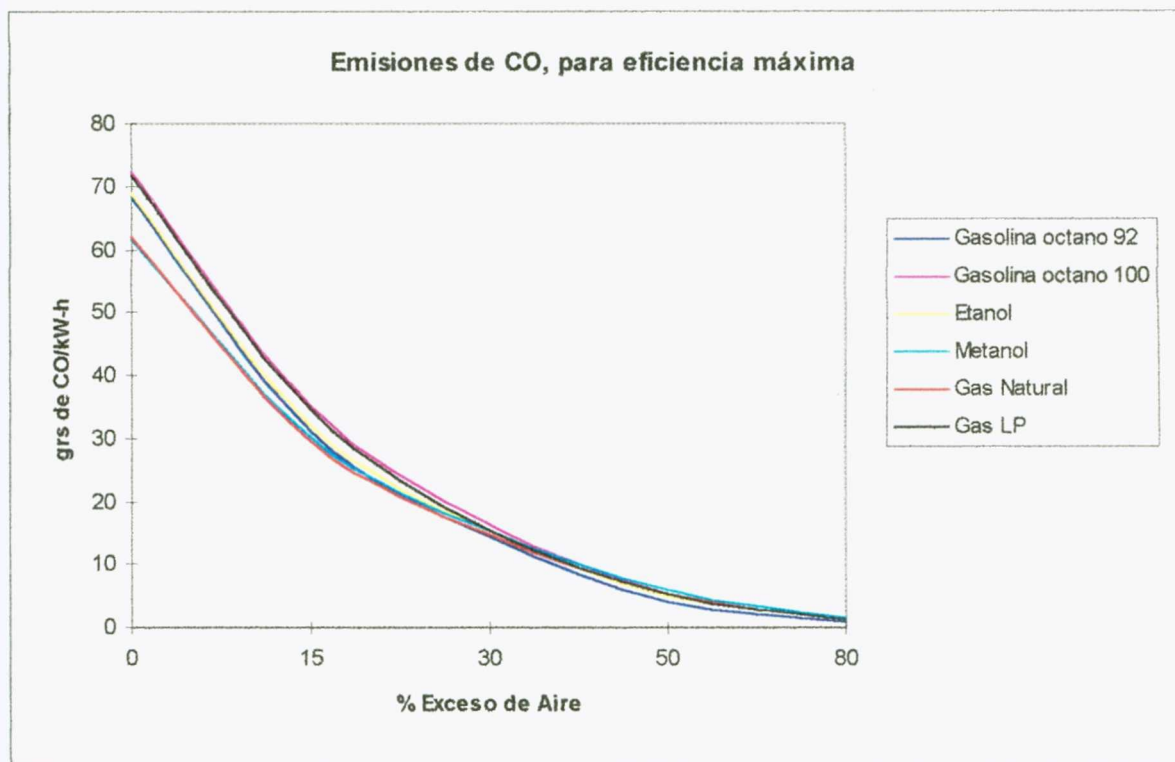


Figura 2.18 Emisiones de CO para diferentes combustibles en un motor de combustión interna con ignición por chispa.

2.6.1.5. Reactividad de los hidrocarburos.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta es el tipo de hidrocarburos que contienen los combustibles, ya que dependiendo de los compuestos que se trate participarán más o menos en las reacciones involucradas en el smog fotoquímico. En términos generales, la reactividad de los hidrocarburos, ordenados de menor a mayor es como sigue:

- Metano (prácticamente se considera no reactivo)
- Alcanos de 2 a 5 carbonos.
- Alcanos de más de 5 carbonos.
- Monoalquil aromáticos.
- Etileno.
- Di- y tri - alquilaromáticos y alquenos terminales.
- Alquenos con enlaces dobles internos.

Debido a la baja o casi nula reactividad del metano, al resto de hidrocarburos se les suele denominar no-metánicos, dando a entender que de alguna manera participaron en las reacciones fotoquímicas.

De acuerdo a lo anterior, a los combustibles analizados se les puede asignar un valor cualitativo en función de su composición:

- Gasolinas altamente contaminantes (es una mezcla de una gran cantidad de hidrocarburos)
- Gas LP Algo contaminante (compuesto principalmente de propano y butano)
- Gas natural Poco contaminante (85-90% es metano, el resto es etano y trazas de otros)
- Alcoholes No contaminantes.
- Hidrógeno No contaminante.

Considerando que los agentes principales involucrados en la formación del smog fotoquímico son los NO_x y los hidrocarburos, entonces el criterio a seguir para determinar la contribución de un combustible a este problema de contaminación deberá ser las emisiones de NO_x en cantidad y la reactividad de los hidrocarburos de que esta compuesto el combustible, asumiendo que las emisiones de hidrocarburos sean similares en un mismo motor.

Por todo lo anterior se puede concluir que si se pretende utilizar como estrategia para abatir el ozono urbano la disminución en NO_x, no sería recomendable la sustitución de combustibles, ya que de acuerdo a los resultados, estos emiten más NO que la gasolina, a excepción del metanol en un determinado rango de porcentaje de aire en exceso. Sin embargo, si la estrategia consiste en disminuir los hidrocarburos reactivos en la atmósfera, entonces si conviene sustituir la gasolina por algún combustible alternativo.

2.6.1.6 Comparación de los aspectos inherentes al combustible.

Con los resultados anteriores se puede obtener un análisis comparativo de los seis combustibles analizados que en forma sintética permitan ver sus ventajas y desventajas. El criterio seguido es dar un puntaje del 0 al 5, otorgando 5 cuando la característica a comparar es muy superior a los demás combustibles y 0 cuando es bastante mala. La información se presenta en la tabla 2.6 y gráficamente en la figura 2.19.

Combustible	Densidad energía	Emisiones CO ₂	Emisiones NO	Emisiones CO	Reactividad hidrocarburos	TOTAL
Gasolina	3	1	4	2	0	10
Etanol	2	2	3	2	5	14
Metanol	1	2	4	3	5	15
Hidrógeno	5	5	0	5	5	20
Gas Natural	3	3	1	1	4	12
Gas LP	3	1	2	1	3	10

Tabla 2.6 Criterios cualitativos de la evaluación de las características inherentes a los combustibles.

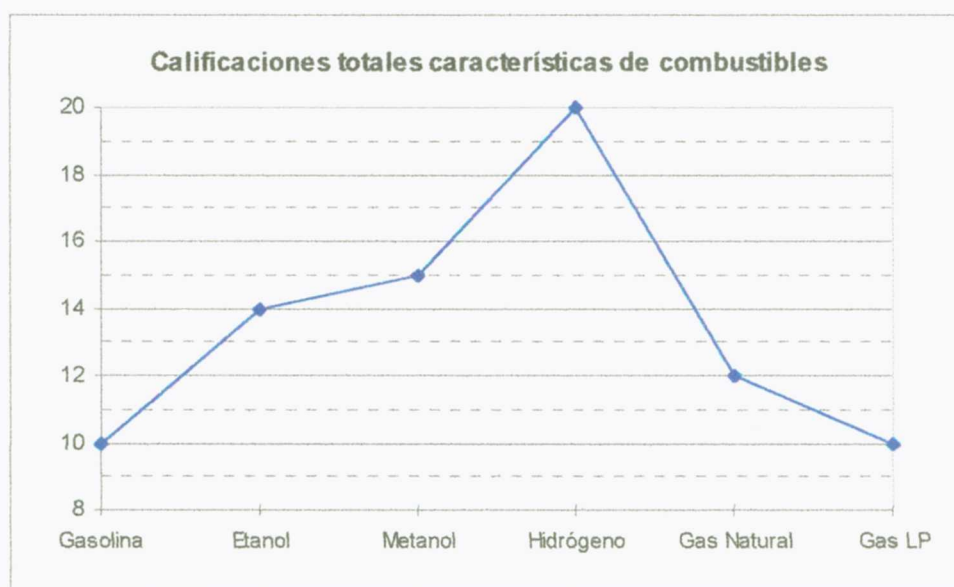


Figura 2.19 Análisis comparativo de las características inherentes a los combustibles.

De acuerdo a estos resultados, se puede observar que los dos combustibles de mayor uso en el autotransporte, la gasolina y el gas LP, son los que presentan las características menos deseables ya que dan el menor puntaje. El hidrógeno es por mucho el mejor combustible desde el punto de vista de rendimiento y emisión de contaminantes.

Esto nos lleva a concluir que desde el punto de vista del desarrollo sostenible, tratándose del uso racional de los energéticos y la contaminación ambiental, será conveniente en la medida de lo posible la implementación de autos que funcionen con hidrógeno y en su defecto se utilice metanol o etanol.

Ahora, considerando que ninguno de los tres combustibles mencionados se encuentran en forma natural, sería interesante que se realizara investigación sobre los efectos de contaminación ambiental y el gasto energético adicional que implicaría la fabricación de

estos e incluirlos en el análisis. También sería necesario incluir los mismos factores por la extracción y procesamiento de los derivados del petróleo. Aspectos que quedan fuera del alcance del presente trabajo.

2.6.2 Viabilidad de los combustibles

Tipo de almacenamiento:

El gas natural requiere un tanque a presión muy especializado, hecho de fibra de carbón. Este tipo de recipiente eleva el precio del automóvil. Adicionalmente, no se encuentran disponibles todavía en México por lo que tendría que ser importado (ver Anexo 2). Algo similar se tendría que utilizar para el hidrógeno.

Por lo contrario, para el gas LP el almacenamiento está totalmente disponible en México, existen establecimientos de distribución en prácticamente cualquier localidad. En el Anexo 2 se muestra una figura sobre el dispositivo necesario para convertir un motor de gasolina a gas LP. Se encuentra restringido a vehículos oficiales, pero podría hacerse la transición a vehículos particulares.

Los demás combustibles analizados no tienen problema de almacenamiento por encontrarse en estado líquido a las condiciones atmosféricas.

Tanques de almacenamiento a presión y temperatura normales	2
Tanques presurizados	1
Tanques presurizados con aditamentos especializados	0

Renovabilidad

Renovables son aquellos, que como los alcoholes y el hidrógeno, pueden obtenerse de recursos de la naturaleza que se regeneran constantemente. Los no renovables son los provenientes de fuentes de petróleo. Sin importar la viabilidad que presenten en otros aspectos, se tienen que buscar estrategias orientadas a la conversión de los motores de los vehículos a que utilicen fuentes de energía de las que se pueda asegurar el abasto en el largo plazo.

Renovable	1
No renovable	0

Costo

Los costos en el mercado de los combustibles que están siendo analizados se encuentran en la tabla 2.7. y su comparación gráfica en la figura 2.20. La unidad de medida se ha homogeneizado utilizando el costo en pesos por cada unidad de densidad de energía.

Combustible	Costo/m ³	Costo/kg	\$ / kW-h
Hidrógeno	\$53.00	\$593.6	27.48
Gas Natural	\$0.90	\$1.114	0.129
Gas LP	\$1.27	\$0.558	0.076
Alcohol metílico	\$2,000	\$2.51	0.714
Alcohol etílico	\$5,000	\$6.32	1.485
Gasolina 92	\$3,000	\$4.054	0.562
Gasolina 100	\$3,000	\$4.054	0.538

Tabla 2.7 Costos comparativos de los combustibles por cantidad de energía. Precios obtenidos de investigación directa con proveedores locales.

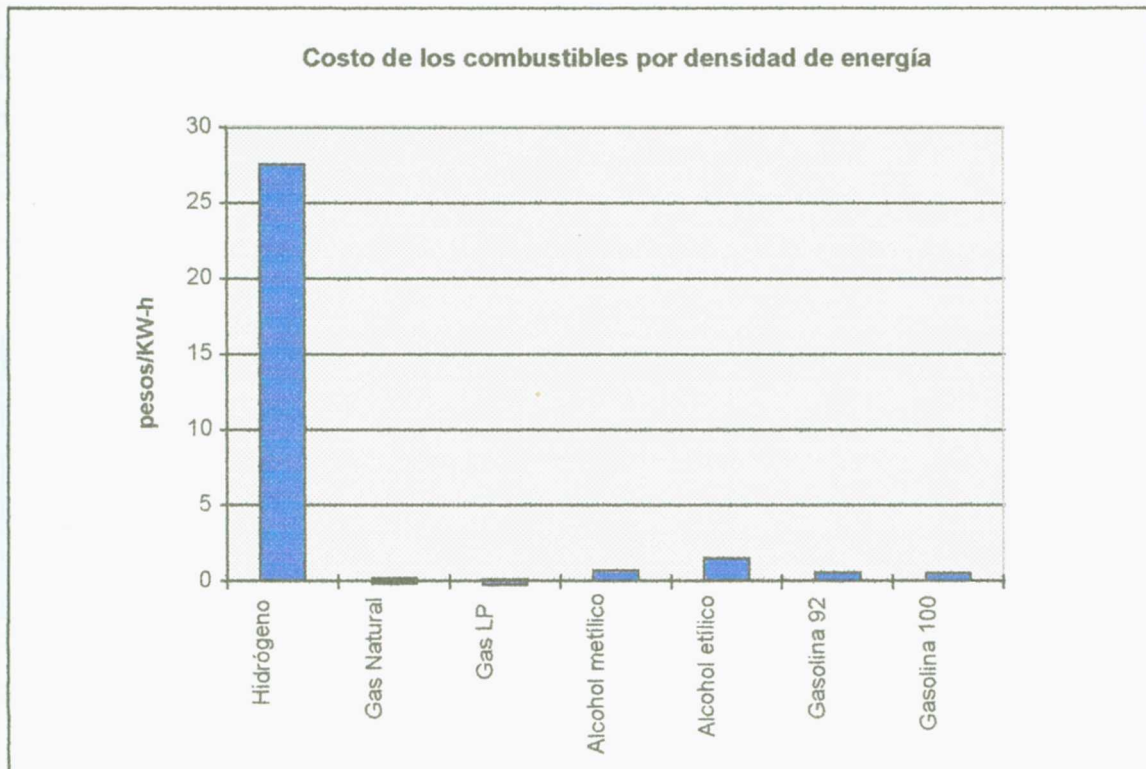


Figura 2.20. Gráfica comparativa de los costos de los combustibles por densidad de energía.

En la figura 2.20 y tabla 2.7 anteriores se puede observar cómo en precio por metro cúbico o por kilogramo, el etanol o alcohol etílico es la alternativa más cara, mientras que en cuanto a su densidad de energía, la diferencia más amplia puede observarse para el

hidrógeno. El gas LP es 8 veces más económico que la gasolina, 10 que el metanol y 20 que el etanol. Comparado con el hidrógeno es más de 300 veces menor.

En este caso, el gas LP y el gas natural son las alternativas más económicas, sin embargo, existen otros factores que considerar.

Para clasificar el costo, se pueden dividir en cinco categorías

Muy Alto	0
Alto	1
Medio	2
Bajo	3
Muy Bajo	5

Disponibilidad

Se hizo una estimación con base en la experiencia y conocimientos de cuál será la disponibilidad del combustible para ser utilizado de forma masiva como fuente de energía para la totalidad o gran parte del parque vehicular de la Ciudad de Guadalajara.

Fácilmente disponible actualmente	2
Medianamente disponible actualmente	1
Difícilmente disponible actualmente	0

En la tabla 2.8 se hace el análisis comparativo de acuerdo a la viabilidad de los combustibles analizados.

Combustible	Costo	Almacenamiento	Renovabilidad	Disponibilidad	TOTAL
Gasolina	4	2	0	2	8
Etanol	2	2	1	1	6
Metanol	3	2	1	1	7
Hidrógeno	0	0	1	0	1
Gas Natural	4	0	0	1	5
Gas LP	5	1	0	2	8

Tabla 2.8 Criterios cualitativos de la evaluación de la viabilidad de los combustibles.

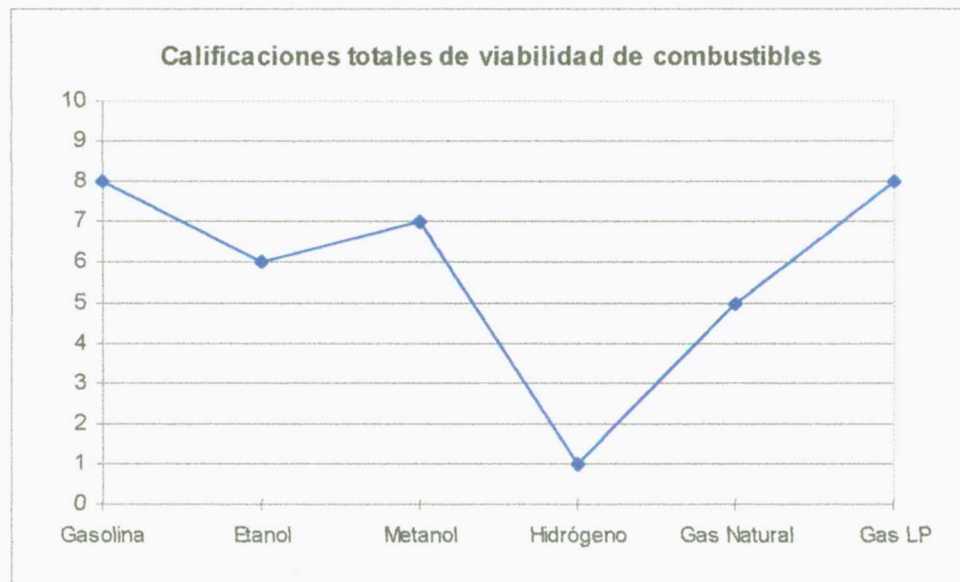


Figura 2.21 Comparación de las calificaciones totales de la viabilidad de los combustibles.

De acuerdo a la figura 2.21, las mejores alternativas en cuanto a viabilidad son la gasolina y el gas LP, seguidos por el metanol.

De la viabilidad se puede concluir que mientras dispongamos de los combustibles provenientes del petróleo, una muy buena opción es reemplazar la gasolina por gas LP, ya que el segundo tiene emisiones menores de hidrocarburos reactivos.

A largo plazo se deben enfocar los esfuerzos de la investigación en desarrollar tecnologías que optimicen la producción de metanol a partir de biomasa para obtener así un sustituto renovable de los derivados del petróleo.

3. GENERACIÓN DE ENERGÍA EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS A PARTIR DE VAPOR

La mayor parte de la energía eléctrica que consumimos se genera en las grandes centrales termoeléctricas de turbinas de vapor. El fundamento de funcionamiento de estos sistemas se basa en el ciclo de Rankine, el cual, como cualquier máquina térmica, recibe calor de una fuente de alta temperatura, parte de éste lo convierte en trabajo y el resto se desecha a un sumidero como calor de desecho. En la figura 3.1 se muestran los componentes básicos de una planta termoeléctrica.

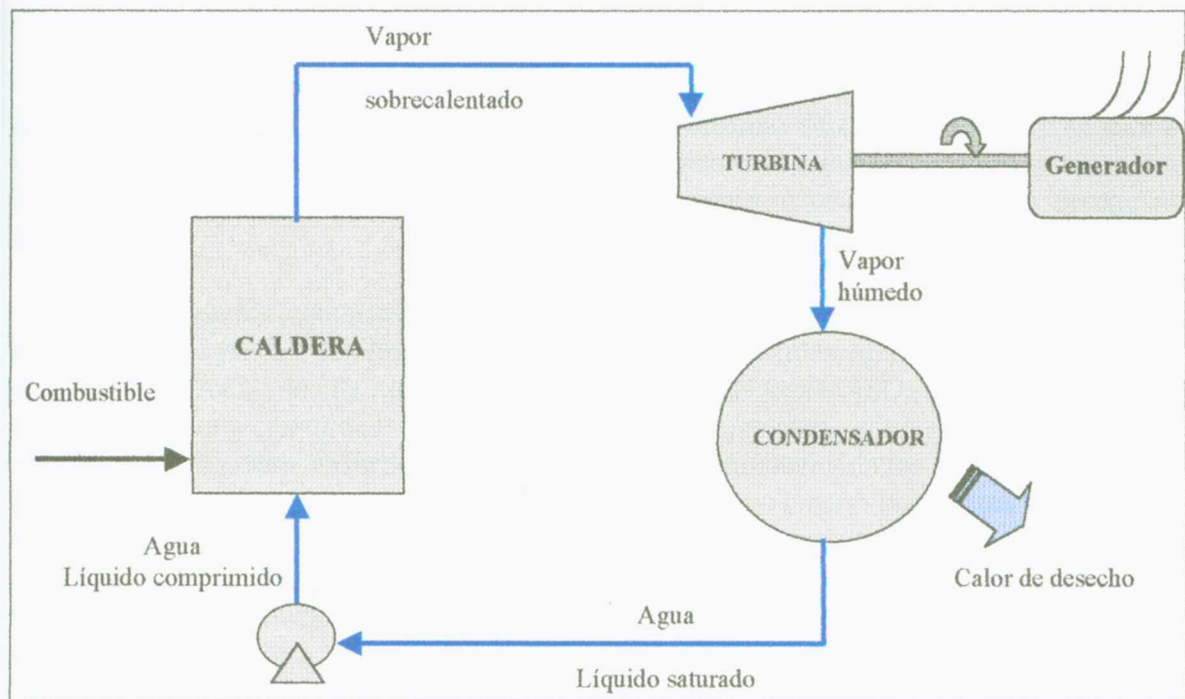


Figura 3.1 Componentes básicos de una central termoeléctrica.

Como se puede observar en la figura 3.1, se trata de un sistema cuyo fluido de trabajo es agua que opera en un circuito cerrado, cambiando de fase y condiciones al pasar por los diferentes dispositivos. En la caldera el agua se calienta al recibir energía en forma de calor, produciéndose vapor a altas presiones y temperaturas que serán capaces de mover la turbina y ésta a su vez un generador al cual está conectada. El vapor exhausto, a baja temperatura y presión que sale de la turbina se envía al condensador donde se le extrae el calor necesario para llevarlo a la fase de líquido saturado. El agua líquida se bombea entonces a la caldera, completándose el ciclo para dar inicio a uno nuevo.

A las centrales termoeléctricas se les asignan diferentes denominaciones dependiendo de la fuente de energía que se utilice para calentar el vapor, es decir, el combustible de la caldera.

DENOMINACIÓN	COMBUSTIBLE
Termoeléctrica	Derivados del petróleo.
Carboeléctrica	Carbón
Nucleoeléctrica	Uranio, Plutonio
Geotérmica	Agua caliente del subsuelo

Debido a las necesidades de energía eléctrica que demanda la sociedad, se requiere la generación de enormes cantidades y por lo tanto el consumo de combustibles a gran escala. Los combustibles, que son no renovables, se consumen más rápido de lo que se regeneran naturalmente, lo que traerá en consecuencia su agotamiento en un período de tiempo no muy largo.

En el caso de los combustibles de origen fósil, los derivados del petróleo y el carbón, como resultado de su combustión se producen contaminantes atmosféricos importantes, como el CO₂, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x). Las cantidades de estos contaminantes emitidos son tan grandes, que los procesos naturales no disponen del tiempo suficiente para absorberlos y se acumulan ocasionando daños al medio ambiente. Entre los efectos nocivos más importantes provocados por los contaminantes provenientes de las centrales termoeléctricas se encuentra el efecto invernadero o calentamiento global del planeta por la acumulación del CO₂ en la atmósfera y la lluvia ácida. Además se generan residuos sólidos, principalmente en las carboeléctricas, que son un subproducto de la combustión del carbón.

En el caso de las nucleoeléctricas, se han presentado problemas difíciles de resolver en lo que se refiere al tratamiento y disposición de los residuos radioactivos. Por otra parte, los accidentes que se han tenido en diferentes centrales nucleares, especialmente la de Chernobyl, han provocado el rechazo de la sociedad por este tipo de instalaciones.

Como sucede en toda máquina térmica, el calor que ya no puede ser aprovechado, se elimina tirándolo a un sumidero, generalmente a la atmósfera, y al agua de un río, lago o del mar. Esta energía además de desperdiciarla, puede llegar a causar problemas de contaminación térmica al alterar la temperatura del medio acuático donde se descarga el agua de enfriamiento proveniente del condensador (ver figura 3.2).

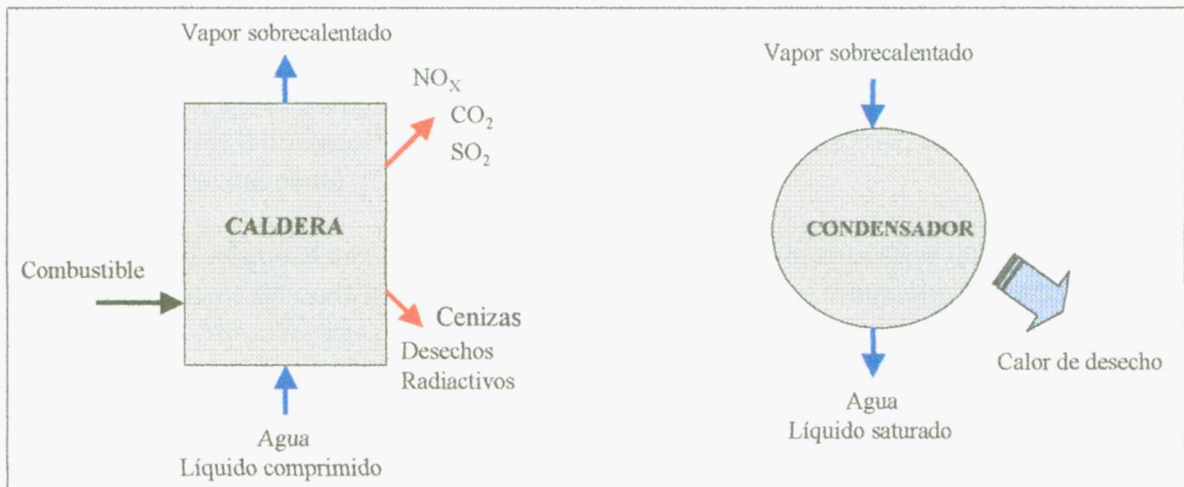


Figura 3.2 Contaminantes asociados a una central termoelectrica.

3.1 Efecto invernadero.

La Tierra mantiene su balance energético recibiendo continuamente energía radiante proveniente de Sol y al mismo tiempo emite energía radiante hacia el espacio, una parte de la energía que recibe la almacena temporalmente en el agua que se evapora, en el viento y en forma de energía química al convertirse en compuestos orgánicos por medio de la fotosíntesis. De la energía solar que llega del Sol, radiación electromagnética de longitud de onda corta, una parte se refleja en la atmósfera o en la superficie de regreso hacia el espacio y otra parte se absorbe calentando la superficie terrestre. La Tierra una vez que se calienta emite esta energía en forma de radiación también pero de longitud de onda larga.

La energía solar que llega a la tierra es de aproximadamente 178,000 terawatts (alrededor de 15,000 veces la energía que se consume en el planeta). De estos, el 30% se refleja inmediatamente de regreso hacia el espacio; otro 50 % es absorbida, convertida en calor y rerradiada. El restante 20 % es responsable del viento, el ciclo del agua y la fotosíntesis³⁸.

La mayor parte de la energía radiante emitida por la superficie terrestre es absorbida en la atmósfera por los gases que no son transparentes a la radiación de onda larga, entre los que se encuentran el vapor de agua, el CO₂, el metano, los clorofluorocarbonos, el N₂O y otros. Estos gases, que se les llama también “gases invernadero”, impiden que la radiación proveniente de la superficie salga directamente al espacio. Esto provoca muchos de los

³⁸ Davis, Ged R. Energy for Planet Earth SCIENTIFIC AMERICAN. Pag. 22

fenómenos atmosféricos (corrientes de aire, formación de nubes, lluvias, etc.), transportan la energía hacia partes más altas de la atmósfera y finalmente es radiada al espacio. La presencia de los gases invernadero es vital, ya que actúan como un cobertor del planeta. Si no fuera por este fenómeno la temperatura del planeta sería muy baja, unos 30 °C más frío de lo que está actualmente.

El problema es que al incrementar la cantidad de gases en la atmósfera que absorben la energía radiante de onda larga, el clima se ve afectado por el rompimiento del balance energético, entrando más energía de la que sale.

Se estima que si se llegara a duplicar la cantidad de gases invernadero en la atmósfera, se reduciría en un 2% la velocidad con que sale la energía radiante del planeta, que aunque parece poco, equivale a la energía que se podría almacenar en 3 millones de toneladas de petróleo cada minuto.³⁹

Las moléculas responsables de la absorción de radiación solar y terrestre son los componentes menores de la atmósfera. En la alta atmósfera, el ozono absorbe eficientemente la radiación solar debajo de los .29 μm (onda corta), mientras que el vapor de agua y el CO_2 absorben una buena parte de la radiación terrestre de longitud de onda larga.

En la figura 3.3 se muestran los rangos de longitud de onda en que absorben energía radiante los diferentes gases que componen la atmósfera. En el lado izquierdo del espectro, a longitudes de onda (λ) pequeñas, es decir, en la región ultravioleta de alta energía (muy dañinos para los organismos vivos), los gases que absorben esta radiación son el oxígeno y el ozono, protegiéndonos de esta radiación. En la región visible, entre 0.4 y 0.7 μm , muy poca de la radiación es absorbida, básicamente en este rango la atmósfera es transparente. De los 0.8 a los 2 μm , la radiación emitida por la superficie terrestre es absorbida moderadamente por el agua y a 15 μm , longitud de onda a la cual la tierra emite la mayor parte de su radiación, el CO_2 la absorbe muy eficientemente debido a su configuración molecular.⁴⁰

El sector energético es el contribuyente principal de las emisiones de origen antropogénico causantes del calentamiento global del planeta, aportando alrededor del 75% del CO_2 , un 20% del metano y una cantidad importante de óxido nitroso (N_2O)⁴¹. Además de los gases de invernadero, emiten óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos, monóxido de carbono (CO) y óxidos de azufre (SO_x), que también afectan los ciclos químicos atmosféricos, siendo precursores de la lluvia ácida y la formación de ozono troposférico.

³⁹ Understanding Climate Change, Web

⁴⁰ Seinfeld, John H. Air Pollution, pag. 443 - 449

⁴¹ Energy and greenhouse emissions, Web

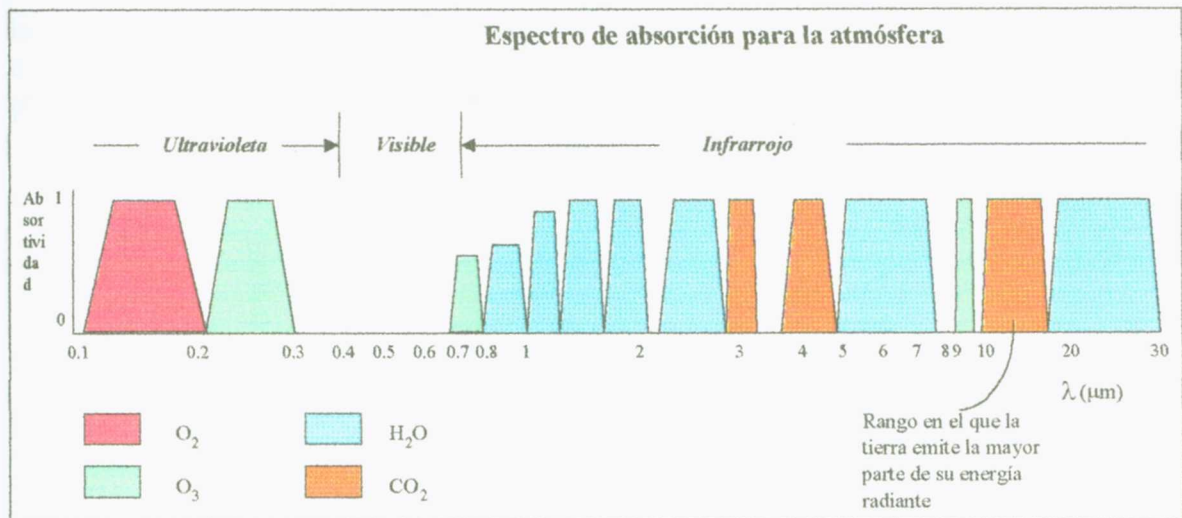


Figura 3.3 Espectro de absorción de la energía radiante para el O₃, O₂, CO₂ y el H₂O.

La concentración de CO₂ y CH₄ en la atmósfera ha estado incrementándose a partir de que las naciones se industrializaron (alrededor de 1850) y de que los bosques se deforestan para usos agrícolas. Se estima que el carbono (en forma de CO₂) añadido anualmente a la atmósfera es de 5 millones de toneladas por la combustión de combustibles fósiles y de 0 a 2 millones de toneladas procedentes de la oxidación de los tejidos de las plantas, basura y del carbón contenido en el suelo, debido principalmente a la deforestación. Una transferencia neta de 4 millones de toneladas de carbono atmosférico hacia los océanos. Lo que da un balance neto de adición de carbono a la atmósfera de entre 2 y 4 millones de toneladas de carbono por año⁴².

La década de los ochenta ha sido el período más caliente registrado en la historia (se han registrado los ocho años más calientes de la historia). Los científicos se han dado a la tarea de predecir el aumento de la temperatura mediante sofisticados modelos matemáticos y el uso de supercomputadoras. La mayoría de los modelos predicen un calentamiento global de 1.5 a 5 °C durante los próximos 100 años, ¡casi tanto como el que se ha dado desde la última glaciación hasta la fecha!

Los análisis en muestras de hielo polar indican que los niveles de CO₂ y CH₄ en la atmósfera antes de la industrialización eran de aproximadamente 260 ppm y 0.7 ppm respectivamente. En los últimos 300 años estos niveles se han incrementado a los valores actuales de aproximadamente 350 ppm y 1.7 ppm respectivamente, lo que representa un incremento de 35% y 143%. Alrededor de la mitad del incremento de CO₂ en los pasados 300 años se atribuye a la deforestación. La concentración de CO₂ en la atmósfera se está incrementando en aproximadamente 1 ppm por año y el metano en 0.02 ppm por año⁴³. En

⁴² Henry, J. Glynn. SCIENCE AND ENGINEERING. Pag. 113-115

⁴³ Manahan. Environmental Chemistry. pp. 409, 410

la figura 3.4 se presenta la tendencia observada en la concentración del CO₂ en la atmósfera a partir de 1958 que se establecieron varias estaciones de monitoreo en diferentes partes del planeta⁴⁴.



Figura 3.4 Tendencia en la concentración media anual del CO₂ en la atmósfera.

Las grandes cantidades de CO₂ que se emiten día con día se atribuyen principalmente a la quema de combustibles para usos industriales y la generación de energía, al autotransporte, los incendios forestales. Por otra parte, el problema se agrava debido a la deforestación, lo que disminuye la capacidad de absorción del CO₂ al disponer de menor vegetación.

La rapidez con la que aumenta la concentración de metano en la atmósfera se puede atribuir a actividades humanas entre las que se encuentran las fugas de gas natural, las emisiones resultantes de la extracción de carbón y recuperación de petróleo. También resultado de fuentes biogénicas entre las que se encuentran la degradación bacteriana de la materia orgánica (rellenos sanitarios), de la biodegradación anaeróbica de materia orgánica en los cultivos de arroz y el emitido como resultado de la acción bacteriana en los tractos digestivos de los rumiantes.

Como el metano es 20 a 30 veces más eficiente que el CO₂ capturando energía radiante de onda larga, un incremento en la concentración de metano tiene un efecto mucho mayor que un incremento similar de CO₂.

Es muy difícil predecir los efectos debido a que el clima es un sistema muy complicado, pero algunos de los efectos esperados son:

⁴⁴ Henry, J. Glynn. op. cit. pag. 114

- Cambio en los patrones climáticos regionales, siendo la sequía uno de los más serios problemas que se deben afrontar.
- Las zonas agrícolas se correrían hacia los polos. En las regiones de latitudes medias se espera que el corrimiento sea de 200 a 300 km por cada grado centígrado de calentamiento.
- El aumento del nivel del mar debido a la expansión térmica del agua y el derretimiento de los glaciares. El promedio global del nivel del mar subió alrededor de 15 cm durante el siglo pasado y si las emisiones de gases invernadero continúan con la misma tendencia, se pronostica que para el año 2100 el nivel del mar habrá aumentado 65 cm.

Seguramente no habrán de pasar dos o tres generaciones para vivir muchos de los efectos del clima, en un futuro no lejano, la gente estará oyendo y viviendo con el problema.

Como medida para atenuar los efectos del calentamiento global del planeta, se han realizado acuerdos en el ámbito internacional con el fin de disminuir la emisión de gases invernadero. Tal es el caso de la UNEP, Programa Ambiental de las Naciones Unidas (por sus siglas en inglés, United Nations Environmental Programme), que a partir de 1992 estableció las bases para tratar asuntos relacionados con el cambio climático a partir del cual varios países alrededor de todo el mundo establecen acuerdos para la reducción en las emisiones de gases invernadero. Esto a través de programas nacionales que permitan una efectiva reducción en las emisiones, especialmente provenientes de la generación de energía, del transporte, la industria, la agricultura, reducción de la deforestación, reforestación y manejo de residuos. También solicitando el desarrollo, implementación y apoyo de tecnologías limpias.

Los países que tienen “altos niveles de vida” son mayormente responsables del incremento de gases invernadero (Europa, Norteamérica, Japón), ya que para lograrlo, han tenido que enviar enormes cantidades del mismo a la atmósfera como resultado de su intensa actividad industrial, agrícola, etc. En ellos vive el 20% de la población pero utilizan el 80% de los recursos mundiales. Se puede decir que ellos viven extremadamente bien. Es atractivo vivir así de bien, pero si todos los habitantes del planeta consumieran tanto como los norteamericanos y los europeos (y miles de millones aspiran a vivir así) probablemente no quedaría suficiente agua limpia ni otros recursos naturales. Los países en desarrollo están en pleno crecimiento y requieren de los energéticos, el problema es que ya se rebasaron los límites en concentración de gases invernadero que la atmósfera es capaz de soportar y para lograr el desarrollo de los países citados, se requiere de la industrialización y en consecuencia de la generación de grandes cantidades de energía con sus respectivas emisiones de contaminantes.

No es fácil lograr el desarrollo económico si se pide a los países en desarrollo que disminuyan el consumo de combustibles fósiles, que son los más comunes, accesibles y económicos. Además el desarrollo o la compra de tecnologías avanzadas es muy costoso. ¿Cómo lograrán progresar entonces? Es más, estas naciones ni siquiera disponen de los recursos económicos ni científicos para hacer frente a los cambios de clima.

La convención para el cambio climático ha pedido a los países desarrollados que sean ellos los que disminuyan sus emisiones, desarrollen nuevas tecnologías y más limpias y que den asistencia técnica y financiera a los países en vías de desarrollo. Los países desarrollados pertenecientes a la Organización para el Desarrollo y Cooperación Económica de la ONU, (OECD por sus siglas en inglés: Organisation for Economic Cooperation and Development) son los comisionados para llevar a cabo la transferencia financiera y de tecnología. Pretenden lograr que los niveles de emisiones de gases invernadero en el año 2000 sean similares a los niveles de 1990. La convención además hace énfasis en la necesidad de dar educación adecuada a la gente respecto al cambio climático⁴⁵.

La tecnología jugará un papel clave en la lucha contra el calentamiento global, reduciendo el consumo de carbón y derivados del petróleo al implementar tecnologías limpias, tales como la energía eólica, la solar y todas aquellas que utilicen energéticos renovables.

3.2 El ciclo Rankine

Los procesos que se siguen en una planta de generación de energía mediante vapor, como ya se indicó anteriormente, se modelan mediante el ciclo de Rankine cuyo funcionamiento es muy parecido al ciclo de Carnot. El ciclo Rankine simple está formado por cuatro procesos, dos de adición de calor a presión constante y dos adiabáticos, que en el caso ideal son reversibles. Los procesos isobáricos son la adición de calor en la caldera y el rechazo de calor en el condensador. Los procesos adiabáticos son la compresión en la bomba y la expansión en la turbina. Estos cuatro procesos se pueden graficar en un diagrama T-S tal y como se muestra en la figura 3.5, donde se comparan con el ciclo de vapor de Carnot en el que se logra que los procesos de adición y rechazo de calor sean isotérmicos además de isobáricos, llevándolos a cabo en la región de cambio de fase (vapor y líquido saturados).

El ciclo de vapor de Carnot que en principio es el más eficiente, no resulta práctico, ya que la composición de la mezcla de líquido y vapor saturados que salen del condensador (estado 4) tendría que controlarse para poder enviarla hacia el compresor. Además como se trata de una mezcla de calidad muy baja le causaría muchos problemas al compresor. Por otro lado, para que funcione tal cual como ciclo de Carnot, su operación queda restringida a la zona comprendida dentro del domo de vapor y no sería factible obtener grandes potencias, representadas por el área encerrada dentro del ciclo.

⁴⁵ Understanding Climate Change, Web

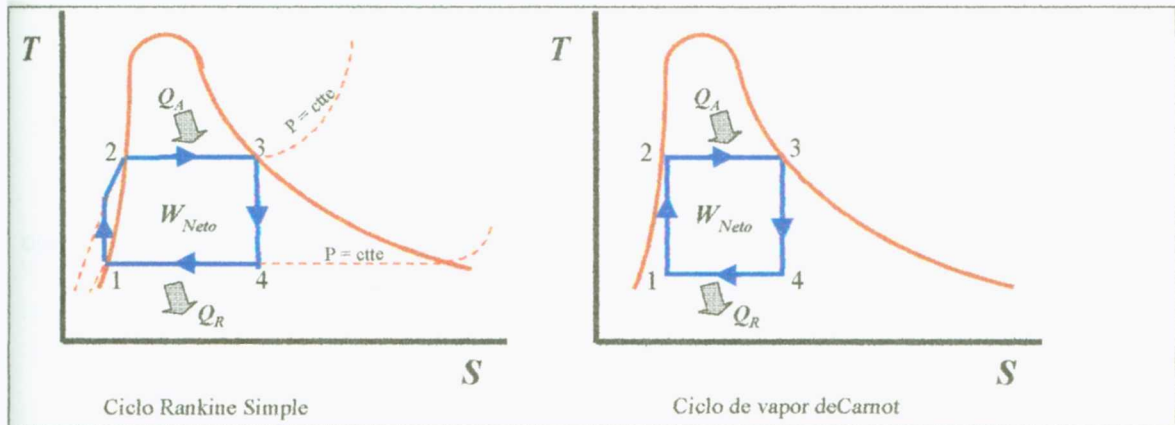


Figura 3.5 Ciclo Rankine simple y ciclo de vapor de Carnot.

En cuanto al ciclo Rankine simple, el problema del manejo de la mezcla de vapor y líquido se soluciona al extraer del condensador solamente líquido saturado, el cual puede comprimirse fácilmente mediante una bomba. Adicionalmente, en la compresión de un líquido se consume menos trabajo que en la compresión de un vapor, ya que una de las variables que afectan al trabajo de compresión es el volumen de la sustancia, tal y como lo establece la primera ley de la termodinámica para un sistema abierto:

$$W = \int_{P_1}^{P_2} v \cdot dP$$

La limitación principal de este ciclo es la calidad del vapor en la turbina, ya que mientras sea menor ésta, la eficiencia de la turbina también disminuye y cuando la calidad es menor al 90%, se pueden presentar problemas de erosión en los álabes de la turbina.⁴⁶

Para solucionar el problema de baja calidad del vapor, se recurre a sobrecalentar el vapor en lugar de extraerlo como vapor saturado de la caldera y de paso se logran mayores potencias de salida. A pesar de que esta acción implique que el comportamiento del ciclo se aleje del de Carnot, es preferible por las ventajas que ofrece.

Si se quiere incrementar aun más la salida de potencia de la planta, se recurre a la instalación de más turbinas o etapas de expansión en la misma turbina, extrayendo el vapor de la turbina, regresándolo a la caldera y una vez que se volvió a sobrecalentar, se pasa a la siguiente etapa de expansión. Al ciclo con las características descritas se le denomina ciclo Rankine con recalentamiento, la figura 3.6 se presenta un esquema del sistema correspondiente al ciclo Rankine con recalentamiento y su correspondiente diagrama en las coordenadas T – S.

⁴⁶ Wark, Kenneth TERMODINAMICA, pag. 695, 696

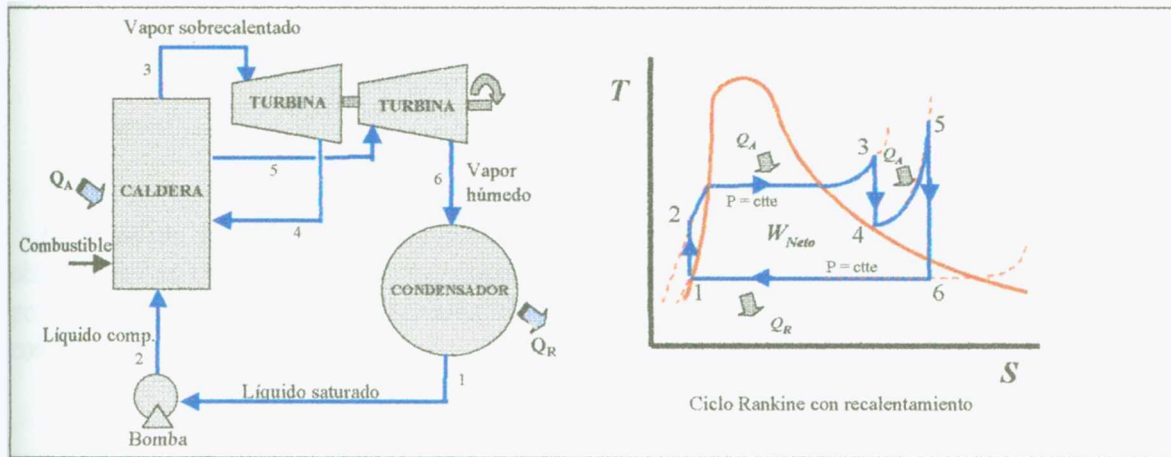


Figura 3.6 Ciclo Rankine con recalentamiento, esquema y diagrama T-S.

3.2.1 Eficiencia del ciclo Rankine

La eficiencia del ciclo Rankine se puede calcular partiendo de la expresión general de eficiencia para las máquinas térmicas:

$$\eta = 1 - \frac{Q_R}{Q_A}$$

En el caso del ciclo simple, el calor rechazado y el calor añadido se pueden calcular partiendo de la primera ley de la termodinámica. Como la presión es constante durante los procesos de adición y rechazo de calor, y considerando que el cambio en energía cinética y potencial son despreciables, entonces se igualan al cambio de entalpía:

$$Q_A = h_3 - h_2$$

$$Q_R = h_4 - h_1$$

Por lo que
$$\eta = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

Y para el ciclo con recalentamiento tal y como se muestra en la figura 3.6:

$$Q_A = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$$

$$Q_R = h_6 - h_1$$

Entonces:

$$\eta = 1 - \frac{h_6 - h_1}{(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)}$$

Los valores de entalpía dependerán de las condiciones de operación del ciclo y se pueden obtener de las tablas de vapor. La máxima temperatura de trabajo del ciclo estará limitada por la resistencia de los materiales de que están compuestos los dispositivos que lo componen.

Como ejemplo se utilizarán las condiciones de operación típicas de la central termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad instalada en el puerto de Manzanillo, Colima⁴⁷. Con los datos de operación disponibles se puede calcular su eficiencia como ciclo Rankine simple:

Presión y temperatura de operación en la caldera:

$$P = 165 \text{ bar}$$
$$T = 540 \text{ }^\circ\text{C}$$

De las tablas de vapor⁴⁸:

$$h = 3403.4 \text{ kJ/kg}$$

El condensador recibe un vapor húmedo a:

$$P = 50 \text{ mm Hg absolutos} = .067 \text{ bar}$$
$$\text{Calidad} = 10.7 \%$$

La entalpía es: $h = 2322.44 \text{ kJ/kg}$

Y la entalpía a la entrada de la caldera es la correspondiente a la del líquido saturado a la presión del condensador:

$$h_1 = 159.91 \text{ kJ/kg}; \quad v_f = 1.007 \text{ cm}^3 / \text{g}$$

La entalpía a la salida de la bomba se calcula con $h_2 = h_1 + v_f(P_2 - P_1)$

$$h_2 = 159.91 \text{ kJ/kg} + (1.007 \text{ cm}^3/\text{g}) \cdot (165 - .067)(\text{bar}) \cdot (0.1 \text{ kJ.g/kg.cm}^3 \cdot \text{bar}) = 176.5 \text{ kJ/kg}$$

Con estos datos se obtienen eficiencias de:

⁴⁷ CFE, Folleto informativo sobre la Central Termoeléctrica MANZANILLO II

⁴⁸ Wark, op. cit. pág. 822 - 829

$$\eta = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{2322.44 - 159.91}{3403.4 - 176.5} = 0.33 = 33\%$$

Si esta fuera la eficiencia térmica real de la central termoeléctrica de Manzanillo, Colima, implicaría que el 67% de la energía del combustible se estaría desperdiciando como calor de desecho en el condensador (y finalmente en el agua del mar). Las emisiones de gases contaminantes por kW.h producido sería bastante elevada, sobre todo tratándose de combustóleo que es el combustible que se utiliza en esta central.

El valor de la eficiencia real de esta planta debe ser un poco mayor, ya que no trabaja como un ciclo simple de Rankine, sino que además de tener recalentamiento, también cuenta con un sistema regenerativo compuesto de 7 calentadores de agua de alimentación y 7 extracciones de vapor, más adelante se trata el ciclo regenerativo.

3.2.2 Eficiencia adiabática de la bomba y la turbina

Los resultados anteriores se obtienen considerando que los procesos de compresión y expansión en la bomba y la turbina respectivamente son ideales, es decir adiabáticos reversibles o isoentrópicos. Lo que realmente sucede es que estos procesos no son reversibles, sino que presentan pérdidas por diversas causas como fricción, turbulencia, etc., que los hace irreversibles y es conveniente considerar esto en los cálculos de la eficiencia térmica. Para considerar estos efectos, se define la eficiencia adiabática de la bomba y de la turbina, comparando el trabajo real con el ideal o isoentrópico y de manera que el resultado se encuentre entre 0 y 1 o expresada en porcentaje, entre 0 y 100%.

Eficiencia adiabática de la turbina:

$$\eta_T = \frac{W_{\text{Real}}}{W_{\text{Isoentrópico}}} = \frac{h_1 - h_2'}{h_1 - h_2}$$

Para la bomba, la eficiencia adiabática se expresa mediante la expresión:

$$\eta_B = \frac{W_{\text{isoentrópica}}}{W_{\text{Real}}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2'}$$

Los procesos se pueden representar en el diagrama T - S tal y como se observa en la figura 3.7

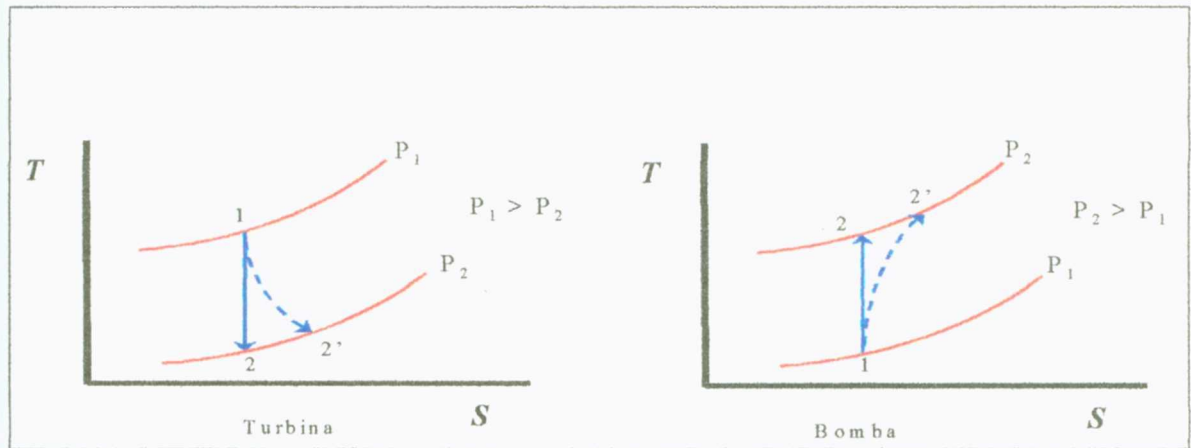


Figura 3.7 Procesos adiabático reversible (isoentrópico) y adiabático irreversible en una turbina y en una bomba.

El término $h_{2'}$ representa el estado real del vapor a la salida de la turbina o de entrada a la bomba.

El efecto que tienen las irreversibilidades de la bomba y sobre todo de la turbina es una disminución sustancial en la eficiencia térmica del ciclo. En la figura 3.8 se presenta el ciclo Rankine con recalentamiento e irreversibilidad en la bomba y en la turbina, que se muestra con líneas a trazos. Las ecuaciones para calcular la eficiencia térmica incluyendo los efectos de las irreversibilidades quedan de la siguiente manera:

$$\eta = 1 - \frac{h_{4'} - h_1}{h_3 - h_{2'}} \quad \text{para el ciclo Rankine simple.}$$

$$\text{y} \quad \eta = 1 - \frac{h_{6'} - h_1}{(h_3 - h_{2'}) + (h_5 - h_{4'})} \quad \text{para el ciclo con recalentamiento.}$$

La entalpía en los estados reales se obtiene de las siguientes expresiones:

$$h_{2'} = h_1 + \eta_C (h_2 - h_1)$$

$$h_{4'} = h_3 - \frac{h_3 - h_4}{\eta_T}$$

$$h_{6'} = h_5 - \frac{h_5 - h_6}{\eta_T}$$

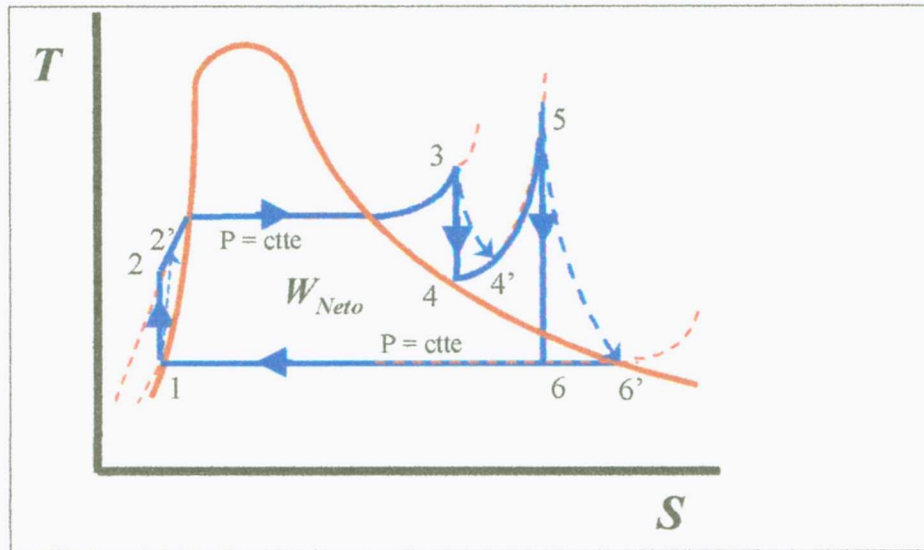


Figura 3.8 Ciclo Rankine irreversible con recalentamiento.

Si se incluye la eficiencia adiabática de la turbina y de la bomba en los cálculos anteriores para el ciclo simple y considerando que la bomba tiene una eficiencia del 80% y la turbina del 85% se obtiene:

$$h_{4'} = h_3 - \eta_T (h_3 - h_4) = 3403.4 - (0.85)(3403.4 - 2322.44) = 2484.6$$

$$h_{2'} = h_1 - \frac{h_1 - h_2}{\eta_B} = 159.91 - \frac{159.91 - 176.5}{0.8} = 180.7$$

$$\eta = 1 - \frac{h_{4'} - h_1}{h_3 - h_{2'}} = 1 - \frac{2484.6 - 159.91}{3403.4 - 180.7} = 0.29 = 29\%$$

Con esto se ve el efecto que tienen las irreversibilidades en la bomba y la turbina disminuyendo apreciablemente la eficiencia térmica del ciclo.

3.3 Mejoras al ciclo y a la eficiencia térmica

Si se busca mejorar la eficiencia térmica del ciclo de Rankine, hay que tomar en cuenta los parámetros que la afectan. Tales parámetros son las temperaturas máxima y mínima del ciclo, las eficiencias adiabáticas de la turbina y la bomba, y en qué medida los procesos del ciclo se aproximan al ciclo de Carnot.

La temperatura máxima queda limitada por los materiales de construcción de la turbina y otros dispositivos de la planta. En cuanto a la temperatura menor del ciclo, también se encuentra limitada por la temperatura del sumidero natural disponible donde se rechaza el calor, generalmente la atmósfera, un lago, un río o el mar. Lo que se puede hacer es incrementar la temperatura promedio a la que se añade calor al ciclo, y esto se logra mediante la regeneración.

3.3.1 El ciclo Rankine con regeneración.

Para mejorar la eficiencia térmica del ciclo se realizan algunas modificaciones que consisten en utilizar parte del vapor sobrecalentado para calentar el agua de alimentación que se dirige hacia la caldera, de manera que el efecto logrado sea un incremento en la temperatura promedio durante el proceso de adición de calor, y de esta manera el ciclo en conjunto se acerca lo más posible al comportamiento del ciclo de Carnot. A este proceso se le conoce como regeneración.

La regeneración se lleva a cabo mediante intercambiadores de calor a través de los cuales circula por un lado el agua proveniente del condensador que va hacia la caldera y por el otro lado recibe vapor sobrecalentado proveniente de extracciones intermedias de la turbina o entre etapas de expansión. El líquido a calentar proviene del condensador o de un calentador de agua de alimentación previo. A estos intercambiadores de calor se les conoce como calentadores de agua de alimentación y hay de dos tipos, calentadores abiertos de agua de alimentación (CA) y calentadores cerrados (CC) de los cuales se presenta un esquema en la figura 3.9.

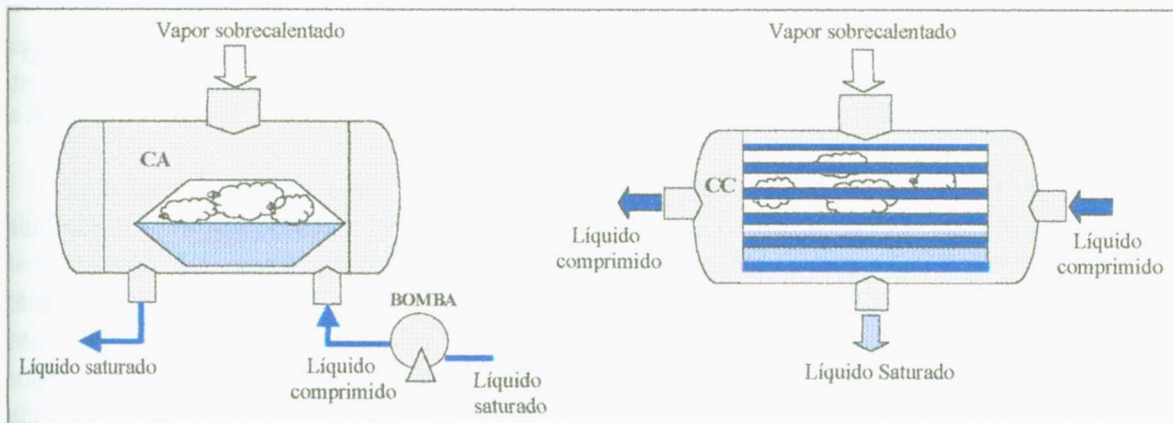


Figura 3.9 Calentadores de agua de alimentación. En el calentador abierto (CA) se mezclan directamente el vapor y el líquido, mientras que en calentador cerrado (CC) el líquido circula por el interior de los tubos debido a que su presión es muy alta, mientras que el vapor circula por la parte externa de los tubos, donde puede llegar a condensarse.

El calentador abierto de agua de alimentación es un intercambiador de calor de contacto directo. En este, se mezclan el vapor y el líquido comprimido, de manera que el vapor transfiere su energía al líquido y la mezcla se regula de forma tal que a la salida se tenga un líquido saturado. Este tipo de calentador se utiliza en las primeras etapas del precalentamiento del agua de alimentación, cuando la presión no es muy alta. El líquido proveniente del condensador o de otro CA, antes de entrar se somete a un proceso de compresión en una bomba para igualar su presión a la del vapor.

En el calentador cerrado, el líquido comprimido que se encuentra a presiones muy elevadas, fluye por el interior de los tubos y el vapor de extracción de la turbina por el exterior donde puede llegar a condensarse, dándose la transferencia de calor a través de las paredes de los tubos. En la Figura 3.10 se muestra un sistema con dos calentadores de agua de alimentación, uno del tipo cerrado y otro abierto.

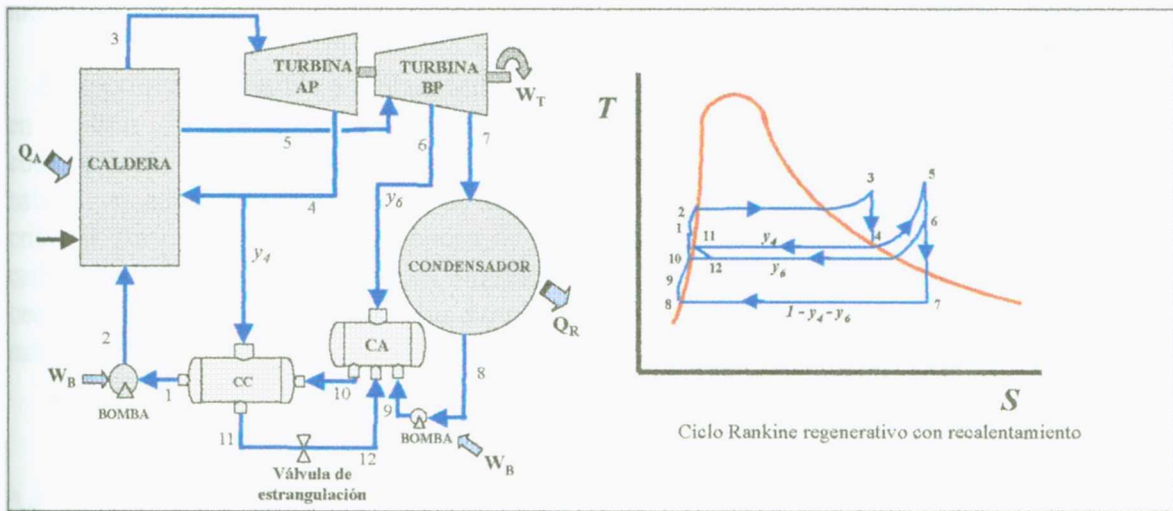


Figura 3.10 Ciclo Rankine regenerativo con recalentamiento, utilizando dos calentadores de agua de alimentación. Los valores de y_4 y y_6 corresponden a la fracción de vapor extraído que se envía a los calentadores.

Como se puede observar en la figura 3.10, al incluir dos calentadores de agua de alimentación, la temperatura promedio de adición de calor inicia en el estado 2, arriba de la temperatura del condensador, estado 8, lográndose con esto un incremento en la temperatura promedio a la que se añade el calor. Por otro lado, la cantidad de calor rechazado disminuye, proceso 7 a 8, ya que no todo el vapor pasa por el condensador, sino solamente una fracción de este ($I - y_4 - y_6$), dando como resultado un incremento en la eficiencia térmica. A la vez el sistema se complica bastante por las corrientes de extracción y las que se regresan o envían a otras partes del sistema, y aún más si se toman en cuenta las eficiencias adiabáticas de la bomba y la turbina.

Conforme se incluye un mayor número de calentadores de agua de alimentación, la eficiencia térmica del ciclo también irá en aumento, pero por motivos de factibilidad económica, generalmente se utilizan entre seis y ocho calentadores⁴⁹.

Las eficiencias térmicas típicas de las centrales termoeléctricas se encuentran en el rango del 40 al 45%, dependiendo de los factores mencionados en los párrafos anteriores.

3.4 Combustibles y contaminación.

La eficiencia térmica de las centrales termoeléctricas no se ve afectada por el tipo de combustible que se esté utilizando, ya que se tienen limitaciones de temperatura como se mencionó anteriormente.

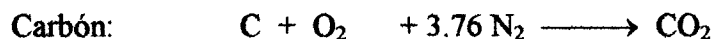
El tipo de combustible a utilizar influye más bien en los costos de operación de la planta y en el tipo y cantidad de contaminantes emitidos por la planta termoeléctrica. Los combustibles más comunes utilizados en este tipo de plantas son el combustóleo, el gas natural, el carbón y los radiactivos como el uranio y el plutonio. Tradicionalmente los criterios para seleccionarlos se basan en el precio y disponibilidad de estos. En Europa el carbón es muy utilizado ya que es muy abundante en algunas de sus regiones, lo mismo las centrales nucleares. En México los combustibles más usados son el combustóleo y el gas natural.

3.4.1 Emisiones de CO₂

La cantidad de CO₂ emitida por una central termoeléctrica dependerá del tipo de combustible que se utilice y la eficiencia térmica de la planta. Se puede calcular tomando en cuenta que todo el carbono contenido en el combustible se convierte en CO₂, y siguiendo el mismo criterio utilizado en el segundo capítulo, a pesar de que también se forme CO, tarde o temprano este se oxidará a CO₂. Hay que recordar que este compuesto no es tóxico para el ser humano, sin embargo la preocupación en cuanto a sus emisiones se debe a que es un gas de invernadero y se tiene el compromiso a escala internacional de disminuir sus emisiones.

A continuación se muestran las reacciones de combustión de los combustibles de origen fósil con la cantidad estequiométrica de aire:

⁴⁹ Wark, keneth, op. cit. pag. 710



Combustóleo: No se dispone de una fórmula representativa para este combustible, sin embargo se tienen datos sobre el contenido de carbono, hidrógeno y azufre⁵⁰:

Análisis aproximado	Porcentaje en peso
Carbono	85.5 %
Azufre	1.50 %
Hidrógeno	13.0 %
Poder calorífico	44,333 kJ/kg

El CO₂ que se formará por kg de combustible es de:

$$(44 \text{ kg CO}_2 / 12 \text{ kg de C})(0.85 \text{ kg de C / kg de carbón}) = 3.166 \text{ kg de CO}_2$$

Gas Natural:



De las reacciones anteriores se puede calcular la cantidad de CO₂ que se producirá por cada uno de los combustibles y se hará en forma similar al capítulo 2 en 2.6.1.3.

Para el carbón se tomará como base para los cálculos, el contenido promedio de carbono reportado de los análisis de diferentes carbones. El porcentaje promedio en peso es aproximadamente del 70% de carbono y de 0.72% de azufre por kilogramo de carbón. El resto son otras sustancias como azufre, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y agua.⁵¹ El poder calorífico correspondiente es aproximadamente de 28,400 kJ/kg. En este caso, se producirán por cada kg de carbón:

$$(44 \text{ Kg de CO}_2 / 12 \text{ kg de C}) (0.7 \text{ kg de C / kg de carbón}) = 2.567 \text{ kg de CO}_2/\text{kg de carbón.}$$

Combustible	Fórmula química	Masa molecular	CO ₂ generado por kg de combustible.
Carbón	C + Otros	---	2.567
Combustóleo	---	---	3.117
Gas natural (85/15)	CH ₄ + C ₂ H ₆	18.1	2.796

⁵⁰ Keating, Eugene L. *Applied Combustion*. Pag. 182

⁵¹ Wark, Keneth, op. cit. Tabla 14-1, pag. 542

Como los tres combustibles tienen diferente poder calorífico, entonces conviene obtener la cantidad de CO₂ que emitirán por unidad de energía producida. En la tabla 3.1 se presentan los resultados, obtenidos en forma similar a los obtenidos en el capítulo 2. Recordar que la densidad de energía se refiere a la energía entregada en kW.h por cada kg de combustible, y la densidad de energía efectiva es la misma, pero multiplicada por la eficiencia térmica, es decir, representa la potencia que se entregará por kg de combustible suministrado. En este caso, se utilizará con fines comparativos una eficiencia térmica del 40%.

Combustible	Poder calorífico inferior (kJ/kg)	Densidad de Energía (kW.h / kg)	Densidad de energía efectiva (kW.h /kg)
Carbón	28,400	7.89	3.16
Combustóleo	44,333	12.315	4.93
Gas natural	46,000	12.78	5.112

Tabla 3.1 Densidad de energía efectiva del carbón, combustóleo y gas natural.

Con los resultados de la tabla 3.1 se pueden estimar las emisiones de CO₂ que se tendrán en una central termoeléctrica cuya eficiencia es del 40% y para cada uno de los combustibles como fuente de suministro de energía. Para su cálculo se toma los resultados previos sobre el CO₂ emitido por kg de combustible, dividiéndolo entre los correspondientes valores de densidad de energía efectiva, como se hizo en el capítulo 2.

Combustible	CO₂ generado por kg de combustible.	Densidad de energía efectiva (kW.h /kg)	CO₂ emitido, kg / kW.h
Carbón	2.567	3.16	0.812
Combustóleo	3.117	4.93	0.632
Gas natural	2.796	5.112	0.547

Se pueden realizar cálculos similares para diferentes eficiencias térmicas y se presenta el resultado gráficamente en la figura 3.11.

De acuerdo a los resultados es claro que el combustible más limpio en cuanto a emisiones de CO₂ es el gas natural y el menos recomendable es el carbón. Desafortunadamente las reservas mundiales de estos combustibles no son iguales, las de carbón son muy superiores a las de gas natural, se estima que las reservas mundiales de carbón durarán unos 1,500 años, mientras que las de gas natural tan solo 115 años, y si se sustituyera el consumo de carbón por gas natural, entonces el gas natural se agotaría en 50 años.⁵² Además la distribución geográfica también es desigual, siendo abundantes alguno de los recursos y otro no en una determinada región.

⁵² Fulkerson, William et. al. Energy from Fossil Fuels. Scientific American. Pag 86

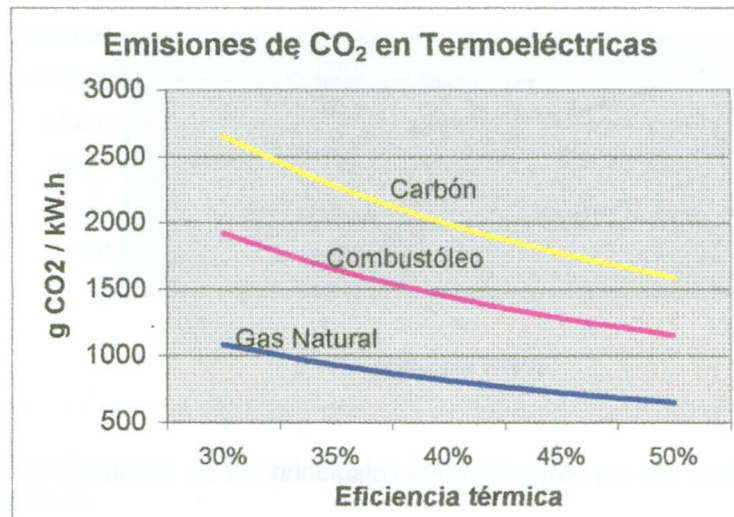


Figura 3.11 Emisiones de CO₂ por una central termoeléctrica para diferentes combustibles y eficiencias térmicas.

Las alternativas mediante las cuales se puede disminuir las emisiones de contaminantes son sistemas que aumenten la eficiencia térmica de las centrales termoeléctricas o tecnologías alternas que consuman en forma más eficiente el carbón, de manera que no sea tan alta su producción de CO₂. Esto se podrá lograr implementando centrales termoeléctricas de altas eficiencias térmicas.

En cuanto a las emisiones de SO₂ y NO_x, se tomará como base valores típicos reportados para estos compuestos, ya que la emisión de estos depende en parte de la cantidad de azufre y nitrógeno que contenga el combustible, así como de las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo la combustión en la caldera. Los valores típicos de emisiones reportados son de 936-1079 gr/kW.h de CO₂, 14-16.4 de SO₂ y 2.5-5.3 de NO_x gr/kW.h.⁵³ y tomando los valores promedio, 1007 g/kW.h para el CO₂, 15.2 g/kw.h para el SO₂ y 3.9 g/kW.h para el NO_x.

Potencia instalada MW	CO ₂ emitido, kg / día	SO ₂ emitido, kg / día	NO _x emitido, kg / día
0.5	12084	182.4	46.8
1	24168	364.8	93.6
5	60420	1824	468
10	120840	3648	936
100	1208400	36480	9360

Los resultados se presentan gráficamente en la figura 3.12.

⁵³ Calculating Environmental Benefits, Web

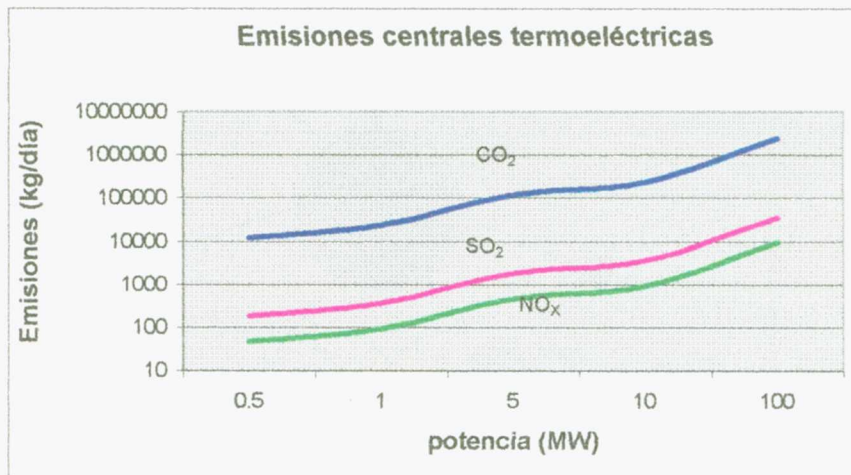


Figura 3.12 Emisiones de los principales contaminantes por las centrales termoeléctricas.

La información de la figura 3.12 es útil para determinar los límites máximos de generación de energía en MW que se pueden instalar en una determinada región en función del establecimiento de un tope en las emisiones de gases contaminantes en el lugar de instalación y para implementar equipos que aprovechen más eficientemente los combustibles en caso de requerirse mayor generación de potencia al límite que se establezca.

3.5 Reactores nucleares.

Los reactores nucleares obtienen la energía de la división o fisión de átomos. Al dividirse un átomo se forman nuevos elementos y se liberan enormes cantidades de energía debido a que la masa de los nuevos elementos es menor a la masa del elemento original, convirtiéndose la masa sobrante en energía. En la figura 3.13 se muestra el proceso de fisión del uranio.

La reacción de la fisión de un núcleo pesado de U^{235} mediante la absorción de un neutrón, es la siguiente:



que produce cesio 140, rubidio 93, tres neutrones y 200 MeV, o $3,2 \times 10^{-11}$ J. Una reacción de fisión nuclear libera una energía 10 millones de veces mayor que una reacción química típica.⁵⁴

⁵⁴"Energía nuclear". *Enciclopedia Microsoft® Encarta® 97* © 1993-1996 Microsoft Corporation.

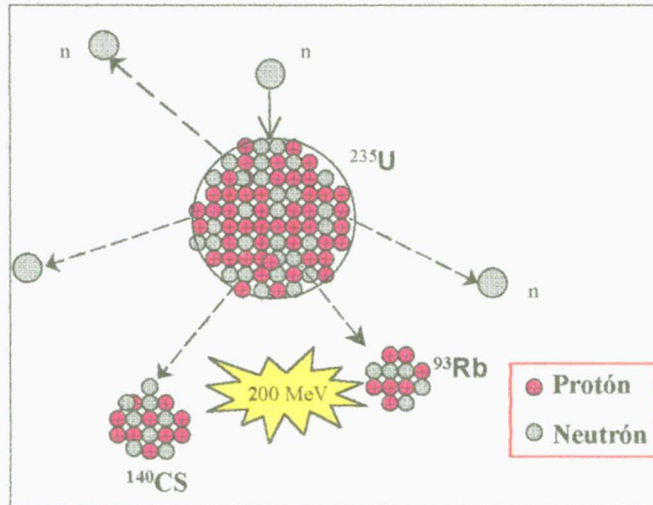


Figura 3.13 Desintegración de un átomo de uranio 235 al recibir el impacto de un neutrón.

La energía generada por la conversión de masa en energía se relaciona mediante la fórmula demostrada por Albert Einstein:

$$E = mc^2$$

Donde E = energía, m – masa y c = velocidad de la luz = 2.988×10^8 m/s.

Para dar una idea de lo que esto representa, se puede calcular la cantidad de energía que produce la conversión de solamente 1 gramo de materia en energía:

$$E = (0.001 \text{ kg})(2.998 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 8.988 \times 10^{13} \text{ J} = 8.988 \times 10^{10} \text{ kJ}$$

Se puede comparar con el carbón, tomando como ejemplo antracita con poder calorífico de $30,540 \text{ kJ/kg}$ ⁵⁵, sería necesario quemar:

$$(8.988 \times 10^{10} \text{ kJ}) / (30,540 \text{ kJ/kg}) = 2.943 \times 10^6 \text{ kg} = 2,943 \text{ toneladas de antracita.}$$

Esto quiere decir que si se utiliza la energía producida por un gramo de materia al convertirse en energía, se dejarían de generar:

$$(2,943,000 \text{ kg de carbón})(2.567 \text{ kg de CO}_2 / \text{kg de carbón}) = 7,554,681 \text{ kg de CO}_2$$

Es decir, ¡por cada gramo de materia convertida a energía, que sustituya su equivalente en carbón, se evitaría la emisión de aproximadamente 7,500 toneladas de CO_2 !

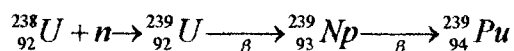
⁵⁵ Keating, Eugene L., Applied Combustion. Pag. 113

El combustible nuclear utilizado es el uranio, que se encuentran en la naturaleza en diferentes isótopos, a partir del 234, el más abundante es el 238 (U^{238}) y el isótopo que presenta actividad de desintegración es el 235 (U^{235}) que se encuentra en una concentración de 0.7% en el uranio natural. Para lograr su desintegración es necesario concentrar el U^{235} de tal forma que al tener una cierta cantidad de estos isótopos unidos (masa crítica) se logra la desintegración nuclear. Por este motivo, se estima que la desintegración de 1 gramo de uranio libera la energía equivalente a la liberada por 2.37 toneladas de carbón.⁵⁶

Los primeros reactores nucleares y que aún se utilizan, fueron los LWR (de sus siglas en inglés light water reactor) utilizan agua común para enfriar el reactor y generar el vapor, son de operación bastante deficiente ya que en estos solamente un 0.6 % de los átomos de uranio se desintegran, el restante 99.4 % se desechan. Estos reactores requieren de 30 toneladas de uranio enriquecido al 3% en U^{235} para generar un GW (gigawatt = 1,000 MW) durante un año. De tal forma que las reservas mundiales estimadas de uranio se agotarían en el transcurso de un siglo utilizando la capacidad nuclear instalada actualmente de aproximadamente 400 GW, que equivale a 70 terawatts-año (1 TW = 1,000 GW). Una vez agotado el combustible nuclear, es necesario renovarlo y para las condiciones mencionadas, se estarían produciendo alrededor de 8,000 toneladas anuales de desechos radioactivos (94% de uranio, 1 % de plutonio y 5 % de productos de la fisión), lo que además requeriría la apertura de un lugar para el confinamiento de estos desechos cada 9 años⁵⁷.

Una nueva tecnología en reactores nucleares que permiten aprovechar más eficientemente el combustible es el FBR (de sus siglas en inglés Fast Breeder Reactor) el que permite producir plutonio fisionable, a partir de uranio no fisionable. en estos reactores se puede obtener hasta 100 veces más energía que en los reactores LWR⁵⁸.

Cuando el uranio 238 absorbe neutrones en el reactor, se convierte en un nuevo material fisionable, el plutonio, a través de un proceso nuclear conocido como desintegración β (beta). La secuencia de las reacciones nucleares es la siguiente.⁵⁹



Esta tecnología además de aprovechar en forma más eficiente el combustible, también generaría una cantidad menor de residuos sólidos. Sin embargo, el combustible agotado del reactor se disuelve en ácido nítrico de cuya solución se extraen el uranio que aún no se ha desintegrado y el plutonio que se formó durante la desintegración del uranio. También los productos de la fusión se extraen por medios químicos. Entonces, a pesar de que estos reactores generan cantidades menores de desechos sólidos, tienen la desventaja de generar desechos líquidos radiactivos que son las soluciones agotadas resultantes del proceso de extracción del uranio y el plutonio.

⁵⁶ Enkerlin, Ernesto C. et al. CIENCIA AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Pag. 216 - 217

⁵⁷ Häfele, Wolf. Energy from Nuclear Power. SCIENTIFIC AMERICAN. Pag. 91 -92

⁵⁸ Häfele, Wolf, op. cit. pag 96

⁵⁹"Energía nuclear", *Enciclopedia Microsoft® Encarta® 97* © 1993-1996 Microsoft Corporation.

3.5.1 Residuos radiactivos

Como ya se mencionó, de la operación de los reactores nucleares resulta la generación de residuos radiactivos que pueden ser muy peligrosos. Estos residuos pueden permanecer radiactivos desde unas cuantas horas hasta miles de años. Por ejemplo, el plutonio es altamente radiactivo y se conserva así por miles de años. Por este motivo no es sencillo encontrar o establecer un lugar adecuado para confinar este tipo de residuos por períodos de tiempo tan largos y sin riesgos. Es necesario disponer de un lugar apropiado para asegurar adecuada protección a la salud y seguridad de la población, así como mantener en condiciones adecuadas de calidad del medio ambiente. Si estos desechos no son confinados adecuadamente puede llegar a contaminar las fuentes de suministro de agua, los suelos y el aire.

Mientras se dispone de un lugar adecuado y seguro para confinar los residuos radiactivos durante períodos de tiempo grandes, la mayoría del combustible nuclear agotado se guarda en albercas con agua ubicadas en el lugar donde se produce. el agua remueve el calor que aún genera el combustible agotado y sirve de escudo protector para los trabajadores.

En cuanto al líquido resultante del proceso de recuperación del plutonio HLW (High Level Radioactive Waste), no se dispone tampoco de un lugar adecuado para su confinamiento, se realizan intentos de solidificarlo para que sea más factible su disposición. Actualmente el HLW se almacena en tanques de acero inoxidable bajo tierra en espera de ser solidificados y enviados a un confinamiento adecuado⁶⁰.

3.5.2 Radiación y sus riesgos

El tipo de radiación que puede causar efectos adversos a la salud es la radiación ionizante, capaz de alterar la composición química de los tejidos. Entre éstas se encuentran las partículas alfa y beta, los rayos gama y los rayos X.

La radiación ionizante puede provocar cambios en el balance químico de las células. Algunos de esos cambios pueden llegar a formar cáncer. También pueden causar mutaciones genéticas que pueden ser transmitidas a futuras generaciones y otros daños como retraso mental en niños, etc. si la dosis es muy elevada, suficiente para causar daño masivo a los tejidos, puede sobrevenir la muerte a pocas semanas de la exposición. Sin embargo, el riesgo de desarrollar cáncer debido a exposición a la radiación es mucho más

⁶⁰ Spent Nuclear Fuel and High-level Radioactive Waste, Web

alta que los otros efectos. Las evidencias que se tienen sugieren que cualquier exposición a radiación ionizante, sin importar la intensidad o el tiempo de exposición, representa algún riesgo, de hecho se establece:

- A mayor dosis de radiación que recibe una persona, es mayor la probabilidad de desarrollar cáncer.
- La posibilidad de adquirir cáncer aumenta conforme aumenta la dosis de radiación, no el tipo o severidad del cáncer.
- Muchos casos de cáncer aparecen varios años después de haber recibido la radiación (10 a 40 años)⁶¹.

Además de la exposición a fuentes externas de radiación, también puede haber exposición internamente por inhalación, ingestión, inyección o absorción de material radiactivo. La severidad del daño causado por la radiación depende del total de energía radiante absorbida, el tiempo de exposición y el órgano expuesto.

La radiación tiene su origen tanto de fuentes naturales como antropogénicas. Entre las naturales se encuentra la radiación proveniente de los rayos cósmicos, elementos radiactivos naturales (uranio, torio, etc.) y productos de la desintegración radiactiva como el radón. De origen antropogénico provienen de hospitales, reactores nucleares, algunos procesos de manufactura y producción de armas nucleares.

Las mayores dosis que recibimos provienen de las fuentes naturales tal y como se observa en la figura 3.14. Incluso, solamente el 0.1% de las fuentes de exposición a radiaciones provienen de los reactores nucleares utilizados en las centrales termoeléctricas⁶².

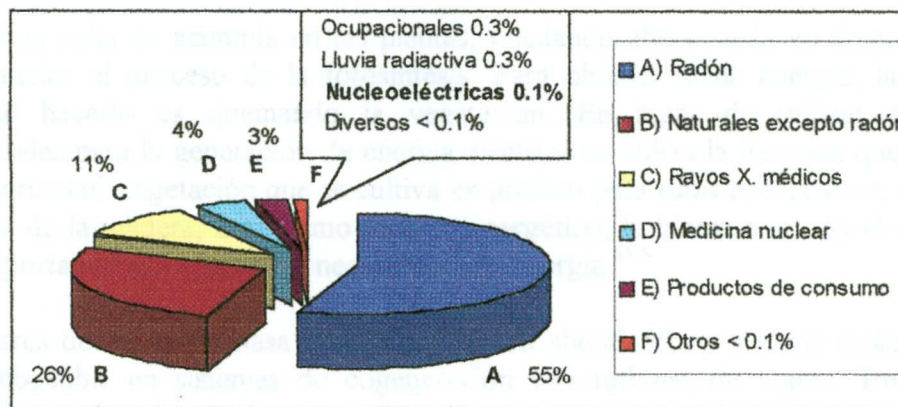


Figura 3.14 Fuentes de exposición a radiación ionizante.

⁶¹ What is radiation?, Web

⁶² A Fact Sheet on the Health effects from Ionizing Radiation, Web

A pesar de las grandes cantidades de energía eléctrica que se puede obtener con las nucleoelectricas y que no generan CO₂, ni contaminantes atmosféricos, tiene las desventajas del problema de confinamiento, el costo de producción es muy alto comparado con otras alternativas, 15.0 ¢ de dólar / kW. Y quizás una de sus mayores desventajas es la poca aceptación por el público, especialmente después de los accidentes de Three Mile Island en 1979 y de Chernobyl en 1986, y el temor de que se utilicen para la fabricación de armamento nuclear. Incluso, por este motivo se suspendieron o retrasó la instalación de varios lugares de confinamiento que técnicamente podrían funcionar bien, como es el caso de Yucca Mountain en los Estados Unidos y Gorleben en Alemania⁶³.

3.6 Energéticos renovables en la caldera

3.6.1 Biomasa

Biomasa, abreviatura de masa biológica, cantidad de materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre, o por organismos de un tipo específico. El término es utilizado con mayor frecuencia en las discusiones relativas a la energía de biomasa, es decir, al combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de recursos biológicos. La energía de biomasa que procede de la madera, residuos agrícolas y estiércol, continúa siendo la fuente principal de energía de las zonas en desarrollo.⁶⁴

La energía solar se acumula en las plantas, quedando almacenada en forma de energía química gracias al proceso de la fotosíntesis. Para obtener dicha energía, la forma más sencilla de hacerlo es quemando la vegetación. En lugar de utilizar combustibles convencionales para la generación de energía eléctrica se utiliza la biomasa que consiste en residuos agrícolas, vegetación que se cultiva ex profeso para estas aplicaciones, desechos de la industria de la madera, etc. Como recurso energético, la biomasa ocupa el cuarto lugar mundial, aportando el 14 % de las necesidades de energía.⁶⁵

En lugares donde la biomasa está disponible en abundancia y a bajos costos, se utiliza como combustible en sistemas de cogeneración con turbinas de vapor. También como combustible para turbinas de gas, utilizando la tecnología adecuada para gasificar la biomasa.

⁶³ Häfele, Wolf, op. cit. pag 91

⁶⁴"Biomasa", *Enciclopedia Microsoft® Encarta® 97* © 1993-1996 Microsoft Corporation.

⁶⁵ Bain, Richard L. et. al. BIOMASS-FIRED POWER GENERATION. Pag. 1

El uso de la biomasa como combustible no contribuye al calentamiento global del planeta, ya que el CO₂ emitido durante la combustión de la biomasa es absorbido nuevamente durante el crecimiento de la vegetación (biomasa), es decir, se recicla el CO₂ en el proceso combustión – crecimiento de la biomasa.

Las tecnologías existentes para la producción de electricidad a partir de la biomasa son la combustión directa, la gasificación y la pirólisis.

La combustión directa implica la oxidación de la biomasa con exceso de aire, obteniéndose gases calientes que se utilizan en la producción de vapor, el que a su vez se utiliza en un ciclo Rankine para la producción de electricidad o en cogeneración.

La gasificación de la biomasa se lleva a cabo oxidándola parcialmente con deficiencia de oxígeno (menos de la cantidad estequiométrica), acompañado normalmente con vapor de agua que provee la energía necesaria para convertir la biomasa en vapores orgánicos y gases. Se utiliza también la gasificación indirecta, que consiste en aplicar calor a la biomasa desde una fuente externa para lograr la descomposición de la biomasa en vapores orgánicos y gases. Estos gases y vapor una vez limpios, se pueden utilizar para alimentar una turbina de gas y generar energía eléctrica.

La pirólisis, que consiste en la descomposición térmica de materia orgánica en ausencia de oxígeno, se aplica calor indirecto a la biomasa en ausencia de oxígeno para convertirla en una mezcla de gases y vapores orgánicos.⁶⁶

También se puede obtener alcohol a partir de la biomasa, mediante la fermentación de los azúcares o mediante su gasificación y síntesis, similar a la obtención de metanol a partir del carbón. Sin embargo, la combustión del metanol obtenido del carbón produce el doble de CO₂ que la gasolina, problema que se resuelve produciendo el metanol a partir de la biomasa. A grandes escalas (y altísimos costos de instalación), la obtención de metanol a partir del carbón es más barato que a partir de la biomasa, pero en pequeñas escalas es más económica su producción a partir de la biomasa.⁶⁷

En forma gaseosa se obtiene metano, producido por la fermentación de basura o desechos de cosechas, que son procesados en digestores donde ciertos microorganismos degradan la materia orgánica produciendo el metano.

En la figura 3.15 se presenta el ciclo formado por al utilización de la biomasa como energético.

⁶⁶ Bain, Richard L., op. cit. Pag. 3

⁶⁷ Weindberg, Carl J. et. al. Energy from the Sun. pag. 104

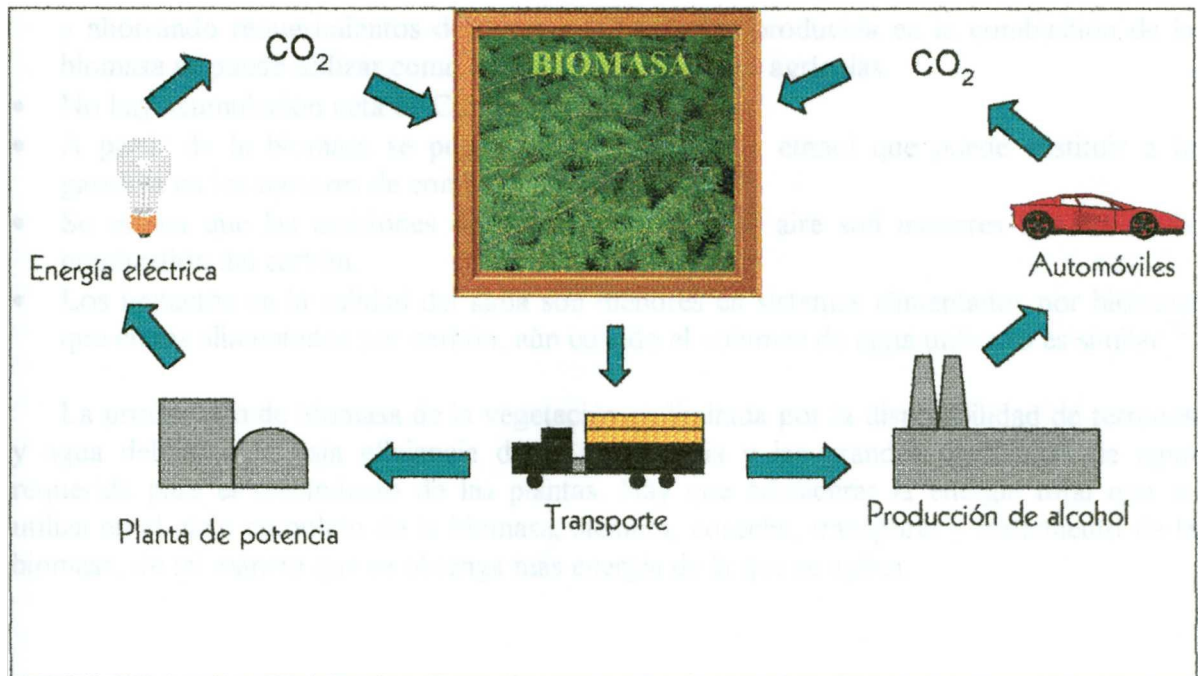


Figura 3.15 Ciclo biomasa – energía. La biomasa es una fuente de energía renovable que convierte la energía que recibe del Sol en energía química. El CO₂ que se produce durante la combustión es absorbido por la vegetación durante su crecimiento.

La más prometedora aplicación de la biomasa es en turbinas de gas, ya que probablemente se podrá comercializar más rápido y a menores precios que con carbón debido a que la biomasa es más fácil de gasificar que el carbón y contiene menos azufre. Incluso, es competitiva en costos con plantas convencionales de carbón, nucleares e hidroeléctricas⁶⁸. El costo reportado en la generación de energía eléctrica a partir de la biomasa es de ¢ 5.0 de dólar / kW•h⁶⁹. Costos de inversión de capital entre 1,000 y 1,500 dólares / kW, con eficiencias térmicas de 36.3 a 39.4 % en aplicaciones de turbinas industriales, y de 44.8 % en sistemas avanzados de turbinas.⁷⁰

El uso de la biomasa como combustible ofrece una serie de ventajas:

- A diferencia de los combustibles fósiles, la biomasa se encuentra distribuida extensamente sobre la superficie terrestre.
- Es un recurso renovable.
- Generalmente contiene menos del 0.1% de azufre (el carbón bituminoso tiene alrededor de un 2 a 3%), contribuyendo a mitigar el problema de la lluvia ácida.
- Contiene entre 3 y 5 % de ceniza (10 a 15% para el carbón bituminoso), reduciéndose de esta manera el envío de cenizas a confinamiento, disminuyendo los costos de disposición

⁶⁸ Enkerlin, Ernesto C. et al. CIENCIA AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Pag. 225 - 226

⁶⁹ Enkerlin, Ernesto C. et al Op. cit. Pag. 207

⁷⁰ Bain, Richard L., op. cit. Pag. 10

y ahorrando requerimientos de espacio.⁷¹ La ceniza producida en la combustión de la biomasa se puede utilizar como enriquecedor de suelos agrícolas.

- No hay acumulación neta de CO₂ en la atmósfera.
- A partir de la biomasa se puede obtener metanol y etanol que puede sustituir a la gasolina en los motores de combustión interna.
- Se estima que las emisiones de sustancias tóxicas al aire son menores que las de la combustión del carbón.
- Los impactos en la calidad del agua son menores en sistemas alimentados por biomasa que en los alimentados por carbón, aún cuando el volumen de agua utilizado es similar.⁷²

La producción de biomasa de la vegetación es limitada por la disponibilidad de terrenos y agua debido a la baja eficiencia de la fotosíntesis y las grandes cantidades de agua requerida para el crecimiento de las plantas. Hay que considerar la energía total que se utiliza en el ciclo completo de la biomasa, siembra, cosecha, transporte y tratamiento de la biomasa, de tal manera que se obtenga más energía de la que se aplica.

3.6.2 Energía geotérmica

La energía geotérmica es la energía almacenada bajo la superficie de la tierra (energía interna) y que puede ser aprovechada en forma de calor, ya que se observa un aumento gradual de la temperatura con la profundidad. Su aprovechamiento es a través del agua caliente proveniente de los mantos acuíferos profundos.

Los elementos que dan origen a un campo geotérmico son⁷³:

- Una fuente de calor magmático.
- Una zona de roca permeable o yacimiento en el cual se puede almacenar un fluido capaz de transportar la energía que en ella se encuentra acumulada.
- Una capa sello o confinante que impida que los fluidos calientes suban hasta la superficie y disipen la energía a la atmósfera.

El calor se produce entre la corteza y el manto superior de la Tierra, sobre todo por desintegración de elementos radiactivos. Esta energía geotérmica se transfiere a la

⁷¹ Weindberg, Carl J. et. al., op. cit. pag 103

⁷² Bain, Richard L., op. cit.

⁷³ ENERGIA GEOTERMICA, Web

superficie por conducción, por movimientos de convección en el magma (roca fundida) y por circulación de agua en las profundidades (convección).⁷⁴

La distribución de temperaturas en el suelo depende principalmente del proceso de conducción y este a su vez de la conductividad térmica de las diferentes rocas que componen el subsuelo. El gradiente de temperaturas es bastante uniforme en la mayor parte de la superficie terrestre y no es despreciable, el gradiente medio en la parte superior de la corteza es de $33^{\circ}\text{C} / \text{km}$, con variaciones en diferentes regiones que van desde los $0.6^{\circ}\text{C} / \text{km}$ hasta los $200^{\circ}\text{C} / \text{km}$ ⁷⁵. El conocimiento de este gradiente en una región determinada permite estimar la temperatura que tiene un manto acuífero situado a una cierta profundidad.

El proceso de convección se da cuando existen terrenos permeables que permiten una rápida circulación de agua en sentido vertical. Este fenómeno tiende a igualar la altura en toda la zona convectiva.

La energía geotérmica se clasifica de acuerdo a la temperatura del agua, la de baja y la de alta energía. La energía geotérmica de baja energía es cuando la temperatura del agua está por debajo de un valor que ya no es posible generar energía eléctrica, este valor oscila entre los 120 y 180°C .

La de baja energía se da por el gradiente normal de temperaturas y se aplica en calefacción urbana, calefacción industrial, calentamiento de invernaderos, piscinas, estaciones termales, extracción de productos químicos de las aguas termales, etc.⁷⁶

La de alta energía, que se genera en zonas donde se encuentran corrientes convectivas de agua caliente en el subsuelo, se utiliza principalmente en aplicaciones de generación de energía eléctrica, es decir, una planta geotérmica, en la cual el calor suministrado al ciclo de potencia proviene del calor de la tierra.

Cuando el agua se encuentra a más de 150°C se dice que es de calidad eléctrica. Se utilizan dos tecnologías diferentes para la producción de energía eléctrica. Cuando el agua está a temperaturas mayores a los 210°C , esta se estrangula de manera que parte del líquido se evapore. El vapor se separa del líquido y se pasa directamente por una turbina. La eficiencia térmica de este tipo de sistemas, es de alrededor de un 15%. Cuando la temperatura es menor a los 210°C , entonces se utiliza un ciclo binario⁷⁷. En éste, participan dos fluidos, uno es el agua geotérmica y el otro es un fluido de menor punto de ebullición

⁷⁴"Geotermia", *Enciclopedia Microsoft® Encarta® 97* © 1993-1996 Microsoft Corporation.

⁷⁵ Enkerlin, Ernesto C., *op. cit.* pag.220

⁷⁶ La recherche. LAS NUEVAS ENERGÍAS. Pag.14-15

⁷⁷ Wark, Keneth. TERMODINÁMICA. Pag. 772-773

que el del agua, puede ser un hidrocarburo de bajo peso molecular como el butano o el hexano, amoniaco o un freón. Este fluido secundario produce el vapor para mover la turbina en un ciclo Rankine simple. En la figura 3.16 se muestra un esquema de los sistemas geotérmicos de generación de energía eléctrica.

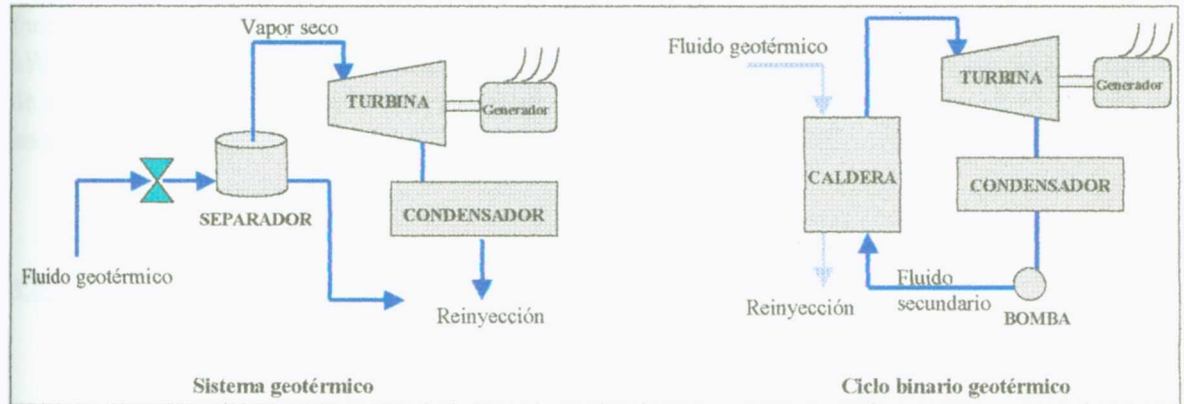


Figura 3.16 Sistemas geotérmicos de generación de energía eléctrica.

El agua de origen geotérmico contiene una gran cantidad de sustancias químicas disueltas, por lo que no es recomendable verterla directamente a los ríos, lagos o al mar, en lugar de esto se procede a reinyectar el agua al subsuelo. La reinyección se hace en un lugar lo suficientemente alejado de los pozos de extracción para evitar su enfriamiento. Al reinyectar el agua, además de evitar la contaminación de las aguas, se repone el agua extraída del pozo geotérmico. El agua geotérmica tiende a ser muy corrosiva debido a las sustancias químicas disueltas, por lo que el equipo a utilizar en la instalación de producción de energía eléctrica debe ser resistente a la corrosión. El material del intercambiador de calor suele hacerse de titanio, por su resistencia a la corrosión. También se tendrán que tomar las medidas adecuadas para dar mantenimiento debido a la incrustación de los equipos. Otra desventaja de estos sistemas es que se pueden llegar a contaminar las aguas subterráneas si no se realiza la reinyección en el lugar apropiado.

Beneficios ambientales de las centrales geotérmicas:

1. En cierta manera, la energía geotérmica se considera como una fuente de energía renovable debido a su vasto potencial energético⁷⁸.
2. Las centrales tienen emisiones muy bajas a la atmósfera. No emiten NO_x, las emisiones de SO₂ son de alrededor del 1% y del 5% de CO₂. Y algunas plantas de potencia geotérmicas no emiten CO₂ (gas invernadero)⁷⁹.
3. Las plantas geotérmicas que cuentan con sistemas modernos de control de emisiones tienen un impacto mínimo sobre el ambiente.

⁷⁸ Enkerlin, Ernesto C. Op. cit. pag. 202

⁷⁹ Renewable Energy: Geothermal Energy, Web

4. El uso de la energía geotérmica ya sea en la producción de energía eléctrica o su uso directo en calentamiento y procesos industriales puede evitar la combustión grandes cantidades de combustibles fósiles.

El costo de generación de energía eléctrica mediante la geotermia es competitivo con las formas convencionales de generación, su costo esta en el rango entre $\$5$ y $\$8$ de dólar por kW.h^{80} , y su vida útil es de entre 20 y 30 años. Además son muy confiables, ya que su factor de carga es de 0.95, es decir, que opera el 95% del tiempo, comparado con el 70 a 80% de las plantas nucleares y de carbón⁸¹.

3.6.3 Energía solar térmica

La energía radiante del sol se puede aprovechar en la generación de energía eléctrica utilizándola como fuente de suministro de calor en lugar de los combustibles en la caldera. Las temperaturas requeridas para la generación de la energía eléctrica se logran concentrando la luz y calor solar mediante espejos que los captan y envían hacia un receptor, donde se calienta un fluido que se encarga de transportar la energía hacia los dispositivos que la convierten en electricidad.

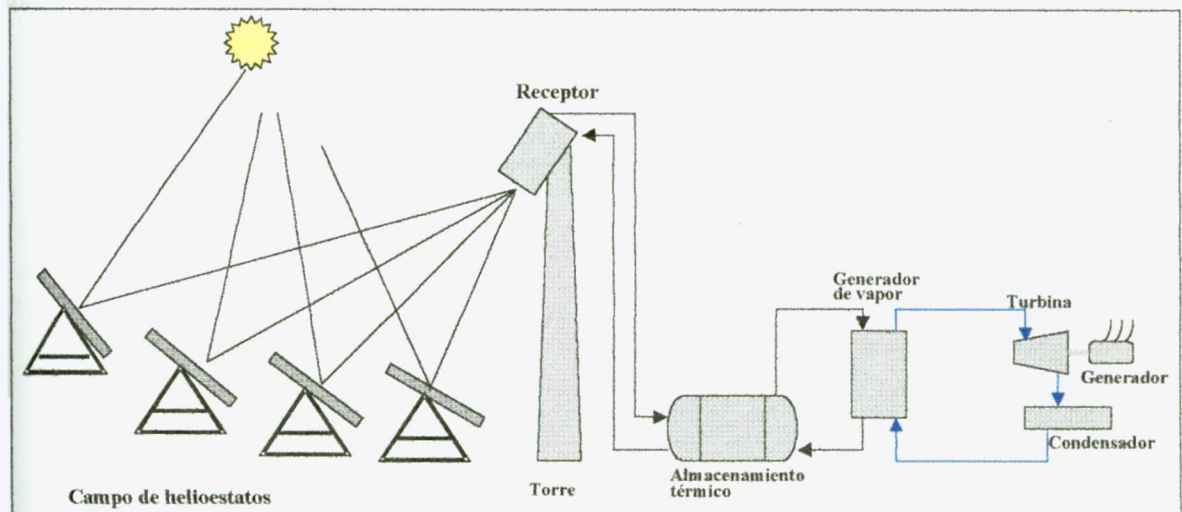


Figura 3.17 Sistema central de torre para la generación de energía eléctrica a partir de energía solar.

Una configuración de una central solar se presenta en la figura 3.17. Se requieren uno o varios receptores de la radiación y una máquina térmica. En el receptor se calienta un fluido

⁸⁰ Geothermal Electricity Production, Web

⁸¹ Renewable Energy: Geothermal Energy, Web

hasta una temperatura determinada, el cual intercambia una parte de la energía en la caldera con otro fluido que trabaja en un ciclo Rankine, y el resto del fluido se envía a un acumulador térmico, del cual se podrá obtener la energía necesaria para que el sistema siga funcionando varias horas después de haberse ocultado el Sol.

El rendimiento del sistema aumenta con la temperatura, pero a temperaturas elevadas en el receptor, el rendimiento disminuye debido a que este presenta pérdidas de calor apreciables por radiación en el rango infrarrojo, ya que la energía radiante emitida, de acuerdo a la ley de Stefan-Boltzman, es proporcional a la temperatura a la cuarta potencia:

$$E_b = \sigma \cdot T^4$$

Donde σ = constante de Stefan-Boltzman = $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

E_b = Poder emisivo de un cuerpo negro o energía radiante emitida por unidad de área.

El cuerpo negro se define como el emisor ideal (o absorbedor ideal), es decir, que a una temperatura dada es el que emite la mayor cantidad de energía radiante (o la absorbe). Los cuerpos reales se modelan como cuerpos grises, que emiten una fracción constante de la energía radiante emitida por el cuerpo negro. Y a bajas temperaturas, la energía radiante emitida es muy poca, pero como esta aumenta con la temperatura a la cuarta potencia, entonces un incremento pequeño en esta implica un aumento muy grande en la energía radiante emitida.

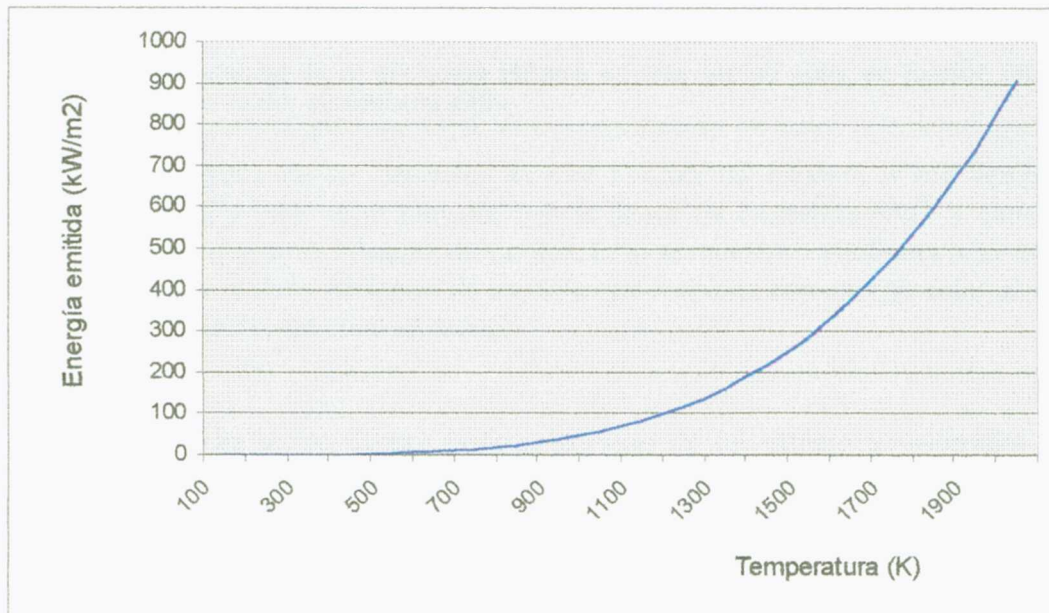


Figura 3.18 Emisión de energía radiante de un cuerpo negro a diferentes temperaturas.

Por ejemplo, un cuerpo negro a 25 °C (298 K) emitirá:

$$E_b = (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(298 \text{ K})^4 = 447.8 \text{ W/m}^2$$

En la figura 3.18 se observa como a temperaturas menores a 600 K (327 °C) la energía radiante emitida por un cuerpo negro es mínima, y a partir de este punto se incrementa apreciablemente conforme aumenta la temperatura. Un cuerpo real emitirá menos energía que la presentada en la figura.

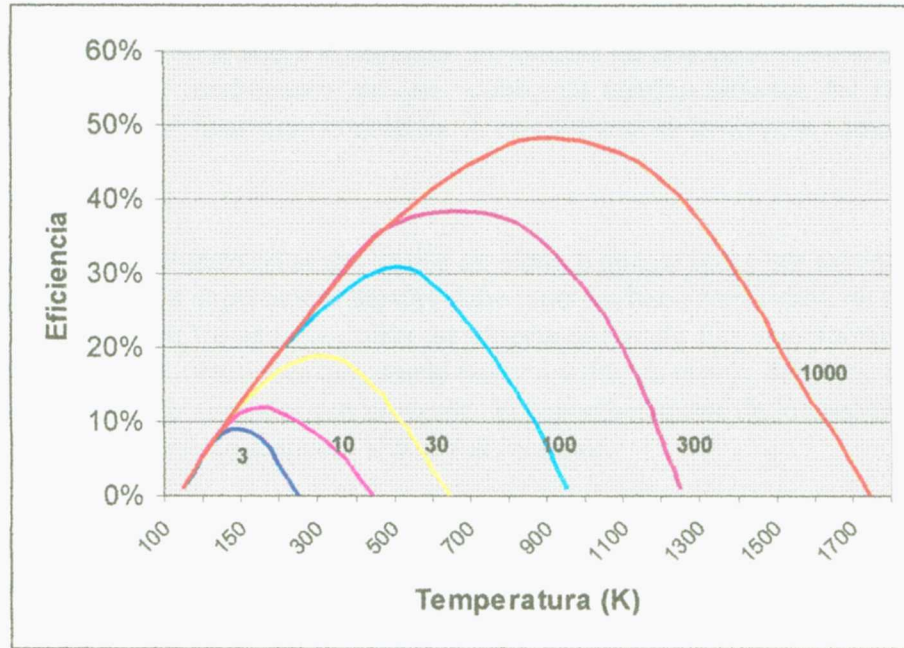


Figura 3.19 Variación de la eficiencia térmica en una central solar en función de la temperatura y el factor de concentración.

La eficiencia térmica de las centrales solares alcanza un máximo a una temperatura óptima del receptor, y este valor aumenta con el factor de concentración⁸² y como es de esperarse, es menor que en la máquina de Carnot. Esto se muestra en la figura 3.19 en la que se presenta la variación de la eficiencia de un ciclo que funciona con energía solar en función de la temperatura y factor de concentración.

El receptor, por lo tanto, deberá estar construido de tal manera y materiales que se disminuya en la medida de lo posible la emisión en el infrarrojo. Otros lugares donde se pueden dar pérdidas son el sistema óptico, los sistemas de transporte de fluidos, en el sistema de almacenamiento térmico, en los intercambiadores de calor y en la turbina.

Los sistemas de concentración de la energía radiante solar pueden ser de varios tipos. El receptor colocado en el foco de un espejo parabólico, que siga el recorrido del Sol durante el día, pero para factores de concentración elevados, el tamaño y propiedades requeridas

⁸² La Recherche, LAS NUEVAS ENERGÍAS. Pag 167-168

hacen que su costo sea muy elevado. Se puede utilizar una batería de espejos parabólicos, cada uno calentando un receptor por el que circula una fracción del fluido, que más adelante se une con el resto del fluido y se envía a la estación de generación. Este sistema es limitado también por las pérdidas en la red de canalizaciones.

Otra configuración que se puede utilizar es poner solamente un receptor y varios espejos individuales (helioestatos), en el orden de varios cientos, que concentran la luz solar de un área muy grande sobre el receptor. El número de helioestatos tiene un límite en el cual se da el mayor rendimiento, ya que conforme quedan alejados del receptor, su ajuste con el receptor se hace muy impreciso. A este sistema se le conoce como central de torre.

El tamaño de los helioestatos se determina de manera que su costo sea mínimo para un rendimiento dado. La superficie reflejante debe tener un buen coeficiente de reflexión y conservarlo por largo tiempo. Se utiliza un soporte adecuado fijo, que permita contrarrestar las deformaciones que puede llegar a sufrir un espejo debido a su peso y a las fuerzas de presión ejercidas por el viento. El soporte dispone de los sistemas adecuados para orientarlo respecto al Sol y el receptor.

Cuando las temperaturas son del orden de los 500 °C en el receptor, se puede utilizar para ciclo de vapor (Rankine), y en el caso de las centrales de torre, que logran temperaturas hasta de 3,000 °C, se puede aplicar en ciclos de turbina de gas (Brayton).

El costo de generar energía eléctrica mediante centrales solares ha ido disminuyendo, para las primeras centrales solares era de ¢ 23 de dólar / kW·h, ahora no está muy lejos de los costos de las centrales convencionales, se reportan costos de ¢ 6 a 7 de dólar / kW·h⁸³

Algunas ventajas de la energía solar térmica son:

- Es una fuente de energía renovable.
- Se encuentra disponible en prácticamente cualquier región.
- La energía solar no tiene costo.
- Los costos de esta tecnología han ido disminuyendo con el tiempo.
- No emite contaminantes a la atmósfera.
- Casi no modifica el balance radiactivo del sistema atmósfera - tierra, tal y como sucede con los sistemas convencionales, los cuales convierten directamente en calor las dos terceras partes de la energía que reciben de los combustibles y, posteriormente, la restante tercera parte termina también en la atmósfera.

Algunas desventajas de estos sistemas son:

⁸³ Renewable Energy: Solar Thermal, Web

- Las fluctuaciones estacionales y por el clima en la radiación solar.
- La relativamente baja densidad de energía.
- No es fácil almacenar la energía obtenida.
- Se requiere de áreas muy grandes para la instalación de una central solar.

Para compensar el problema de la variabilidad de la radiación solar, se puede incluir un quemador de gas que permita mantener constante el flujo de energía requerido.

4. CICLOS DE POTENCIA DE TURBINA DE GAS

Los ciclos de potencia con turbinas de gas se aplican principalmente en la generación de energía eléctrica y en el transporte aéreo. Para su estudio se utiliza el ciclo de Brayton. Un sistema de este tipo está configurado básicamente de tres componentes, compresor, dispositivo de suministro de calor y turbina.

El compresor suministra el fluido de trabajo a altas presiones, que generalmente es aire, le sigue el sistema de adición de calor, que consiste en un quemador donde se alimenta el combustible gaseoso que se mezcla con el aire y se lleva a cabo la combustión, lográndose una mezcla de gases a alta temperatura y presión, y en el caso de que se trate de otro fluido, como podría ser un gas noble, entonces la adición de calor se lleva a cabo mediante un intercambiador de calor. Finalmente el gas a alta temperatura y presión se pasa a la turbina de gas donde la energía que contiene se transforma en trabajo mecánico de rotación, el cual es transmitido a un generador eléctrico. El gas sale de la turbina a menor presión y temperatura hacia la atmósfera, o en el caso de otros gases, se recicla enfriándolo en un intercambiador de calor y regresándolo a la entrada del compresor. Los componentes básicos de un motor de gas se presentan en la figura 4.1.

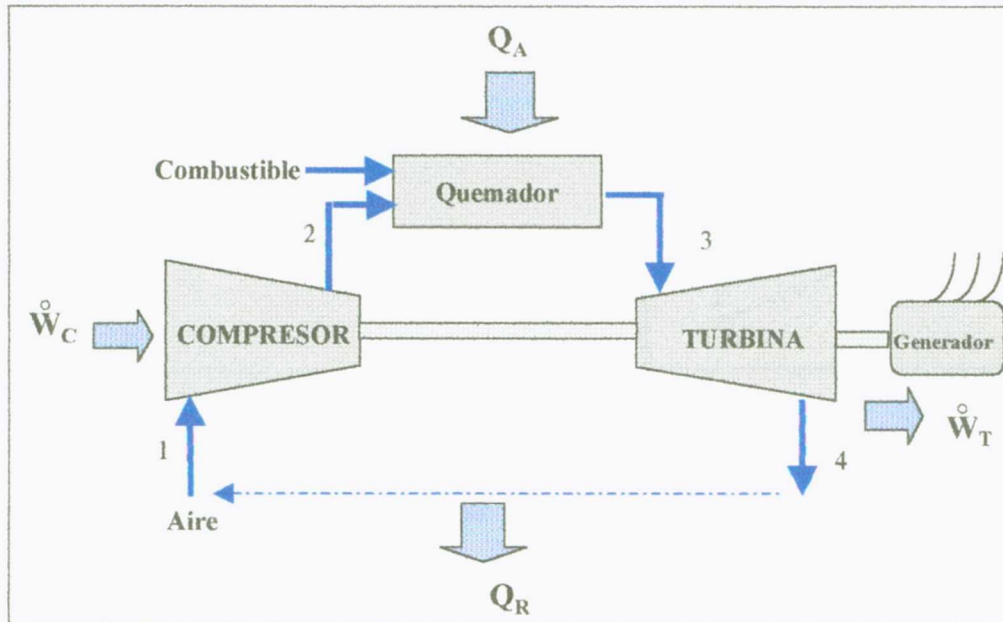


Figura 4.1 Componentes básicos de una sistema de generación de potencia por turbina de gas.

Un aspecto importante a tomar en cuenta es que la potencia que requiere el compresor debe ser suministrada por la turbina, y por tratarse de un gas, el compresor absorbe una parte importante de la potencia de la turbina, de hecho, la relación de trabajo del compresor

al de la turbina (razón de recuperación de trabajo) está entre el 40 y el 80%⁸⁴, por lo que se deberá buscar la máxima eficiencia posible tanto del compresor como de la turbina.

4.1 Ciclo Brayton

El ciclo de Brayton consiste de cuatro procesos reversibles, dos adiabáticos y dos a presión constante. Para su estudio se toma como fluido de trabajo aire normal con las características indicadas en el capítulo 2, y que en el caso de las turbinas de gas esta aproximación no se aleja tanto de la realidad, ya que se suelen utilizar relaciones aire-combustible del orden de 50:1, por lo que las propiedades de los gases producto de la combustión son prácticamente iguales a las del aire. El calor añadido y el calor rechazado en este caso se llevan a cabo con una fuente externa a través de un intercambiador de calor. Los cuatro procesos del ciclo se muestran en la figura 4.2 trazados en un diagrama temperatura - entropía.

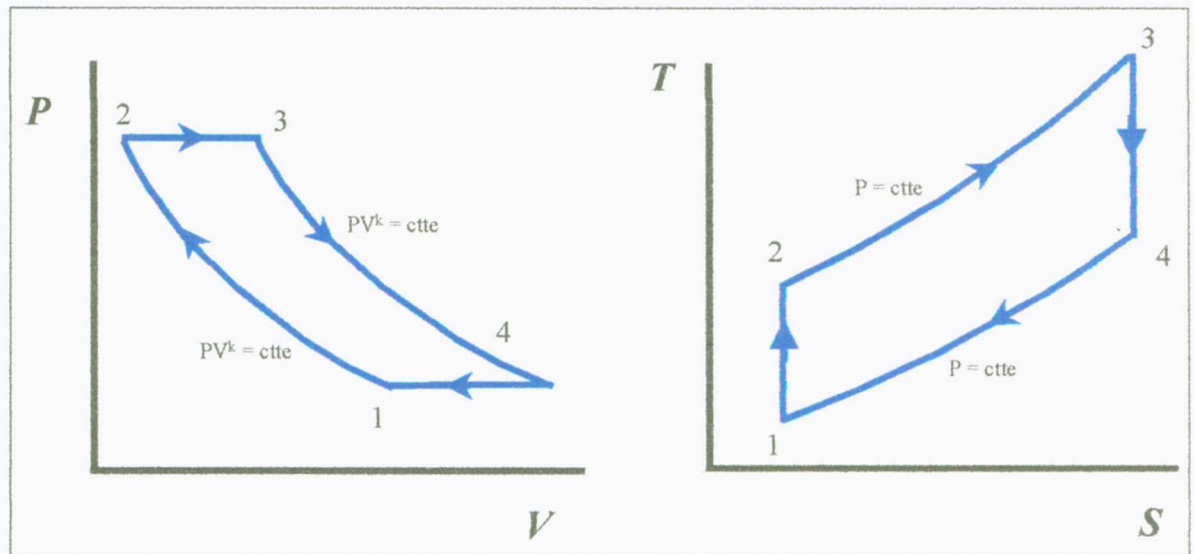


Figura 4.2 Diagramas P-V y T-S del ciclo Brayton

Los procesos son los siguientes:

- 1-2 es la compresión adiabática reversible o isoentrópica.
- 2-3 Adición de calor a presión constante.
- 3-4 Expansión adiabática reversible o isoentrópica.
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante.

⁸⁴ Wark, Kenneth. TERMODINAMICA. Pag. 620

De acuerdo a los procesos mencionados, y considerando que los cambios en energía cinética y potencial son despreciables se puede calcular el calor suministrado y el rechazado a partir de las entalpías:

$$Q_A = h_3 - h_2 \qquad Q_R = h_4 - h_1$$

De tal manera que el trabajo neto que entrega el sistema es:

$$W = Q_A - Q_R = (h_3 - h_2) - (h_4 - h_1)$$

También puede calcularse el trabajo neto como la diferencia del trabajo que entrega la turbina menos el absorbido por el compresor:

$$W = W_T - W_c = (h_2 - h_1) - (h_3 - h_4)$$

La eficiencia térmica será entonces:

$$\eta = 1 - \frac{Q_R}{Q_A} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

Con fin de analizar los parámetros que afectan la eficiencia térmica del ciclo Brayton, se puede considerar que el C_p y C_v del aire son constantes durante todo el ciclo, de manera que la expresión para la eficiencia térmica queda:

$$\eta = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{C_p(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

De los procesos isoentrópicos se obtiene:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} \quad \text{y} \quad \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{T_3}{T_4} \right)^{\frac{(k-1)}{k}}, \quad \text{donde } k = C_p/C_v$$

De aquí se llega a $\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$ y como $r_p = \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$

La eficiencia térmica queda entonces:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{(k-1)}{k}}}$$

De acuerdo a la expresión anterior, para aumentar la eficiencia térmica del ciclo Brayton, es necesario aumentar la relación de presiones r_p . El efecto del aumento de la relación de presiones en la eficiencia se puede ver en la figura 4.3, donde se toma el valor de k del aire igual a 1.4.

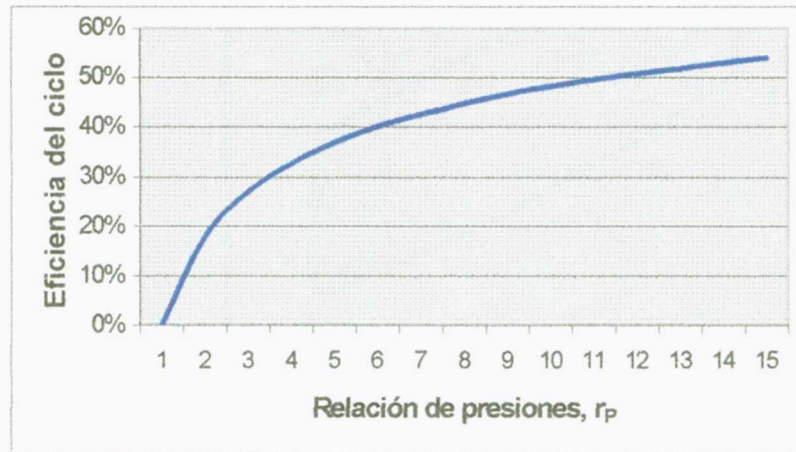


Figura 4.3 Efecto de la relación de presiones en la eficiencia térmica del ciclo Brayton.

Como se puede ver en la gráfica de la figura 4.3, al aumentar el valor de r_p la eficiencia también lo hace. Sin embargo, más allá de 6, no se logra un aumento significativo en la eficiencia.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, una forma de disminuir las emisiones de contaminantes a la atmósfera y en el consumo de combustibles es aumentando la eficiencia térmica del ciclo de potencia. En el caso del ciclo Brayton no es tan simple como incrementar la relación de presiones, ya que se requeriría de un compresor bastante grande y obviamente implicaría una inversión de capital inicial muy alto, además, conforme se aumente la relación de presiones, también irá en aumento la temperatura de los gases a la salida del compresor y los materiales de construcción de los componentes del sistema tienen un límite más allá del cual no pueden funcionar.

Conforme se aumente la relación de presiones, dada una temperatura límite de funcionamiento, se irá incrementando la eficiencia térmica del ciclo ya que se parece cada vez más a un ciclo de Carnot, pero también se llega a un punto donde la salida de trabajo empieza a disminuir y en el caso extremo el trabajo neto del ciclo se hace igual a cero. Esto se puede observar en el diagrama de la figura 4.4.

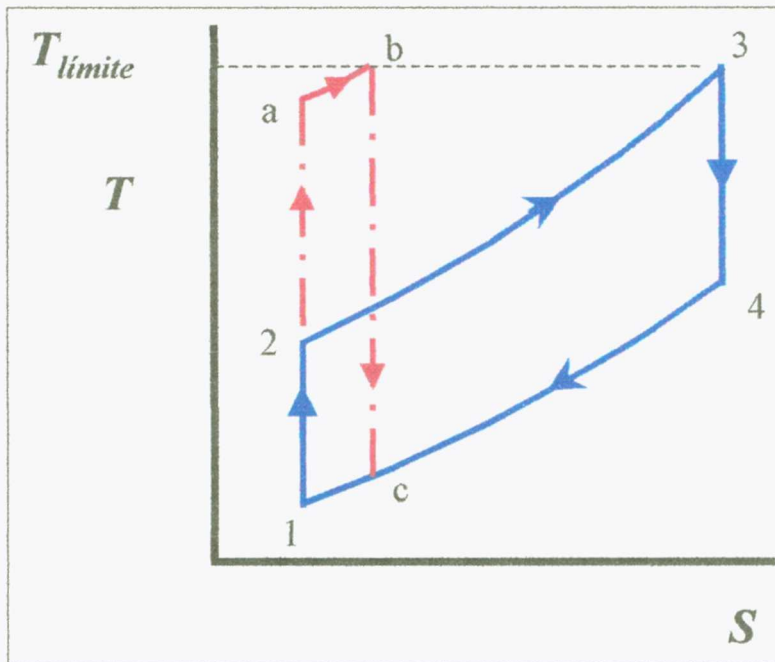


Figura 4.4 Efecto del incremento en la relación de presiones en la salida de trabajo neto en un ciclo Brayton.

El trabajo neto del ciclo formado por 1-a-b-c-1, de la figura 4.4 es menor al del ciclo 1-2-3-4-1. Por lo tanto, se puede calcular a que temperatura debe descargar el compresor para obtener el máximo trabajo del ciclo, a pesar de no lograr la mejor eficiencia térmica, conocida la temperatura de entrada, que generalmente será la temperatura ambiente y la temperatura límite del ciclo. Para ello basta derivar la expresión del trabajo neto con respecto a la temperatura de salida del compresor, T_2 :

$$W = (h_2 - h_1) - (h_3 - h_4) = C_P(T_2 - T_1) - C_P(T_3 - T_4)$$

De las relaciones isoentrópicas se obtiene $T_4 = \frac{T_1 T_3}{T_2}$

Sustituyendo y derivando:

$$\frac{dW}{dT_2} = 0 = \frac{d}{dT_2} \left[C_P \left(T_2 - T_1 - T_3 + \frac{T_1 T_3}{T_2} \right) \right] = 1 - \frac{T_1 T_3}{T_2^2}$$

Por lo que la temperatura de salida óptima del compresor es:

$$T_{2\text{óptima}} = \sqrt{T_1 T_3}$$

El efecto del incremento en la temperatura límite sobre la eficiencia del ciclo Brayton se puede ver en la figura 4.5. Se toma la temperatura de entrada al compresor igual a 25 °C (298 K) y la de salida como la óptima para obtener el trabajo máximo del ciclo. Bajo estas condiciones se puede demostrar que la eficiencia térmica se puede calcular como:

$$\eta = 1 - \sqrt{\frac{T_1}{T_3}}$$

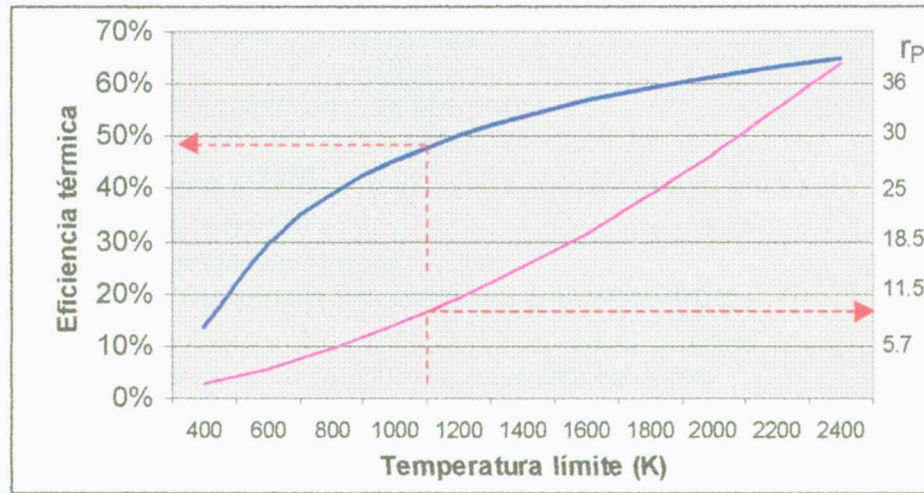


Figura 4.5 Eficiencia térmica del ciclo Brayton en función de la temperatura límite. Se toma la temperatura de entrada al compresor igual a 25 °C (298 K).

Como se puede observar, efectivamente al aumentar la temperatura del gas a la entrada de la turbina, también aumenta la eficiencia térmica del ciclo, pero tiene el inconveniente de que también es necesario subir la relación de presiones y puede llegar a niveles que no sean convenientes. Por otro lado, conforme la temperatura aumenta, también la formación de NO_x y de CO debido a la descomposición térmica. En cuanto a la formación de NO_x se verá favorecida debido a la presencia de oxígeno y nitrógeno en los productos de la combustión, ya que la relación aire-combustible utilizada en estos equipos es muy alta. Esto mismo ayudará a disminuir la formación de CO, ya que la presencia de altas cantidades de oxígeno en los productos facilitará la oxidación del CO a CO₂, además en los productos de la combustión, la concentración de CO será muy baja.

4.2 Emisiones de NO en un ciclo Brayton

Se puede estimar la cantidad de NO de origen térmico que se formará conforme aumenta la temperatura, a partir de la ecuación de equilibrio. Para ilustrar el efecto de la

temperatura en un ciclo Brayton, se puede tomar como ejemplo la combustión de metano, y despreciando el CO formado por los motivos ya expuestos, y del NO₂ que se forma en cantidades despreciables comparado con el NO formado, tal y como lo demuestra Seinfeld⁸⁵.

La temperatura de los productos de la combustión que se dirigen hacia la turbina dependerá de varios factores: el poder calorífico del combustible, la relación aire – combustible utilizada, la temperatura del combustible y del aire a la entrada al quemador. A su vez, la temperatura del aire será la que se tenga a la salida del compresor de acuerdo a la relación de presiones empleada.

Tomando las siguientes condiciones de operación:

Temperatura del metano = 25 °C

Relación de presiones = $r_p = 6$

Presión del aire entrando al compresor = 1 bar

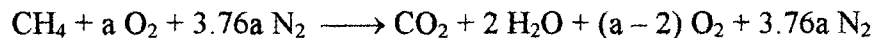
Temperatura del aire a la entrada del compresor = 25 °C = 298 K

La temperatura del aire a la salida del compresor será entonces:

$$T_2 = T_1 \cdot (r_p)^{\frac{k-1}{k}} = (298) \cdot (6)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 497 \text{ K}; \text{ Fijar } T_2 = 500 \text{ K}$$

Se puede considerar que la temperatura de los productos de combustión es la de flama para un proceso de flujo constante y que la disociación del nitrógeno no la afecta apreciablemente debido a las altas relaciones aire – combustible.

La reacción estequiométrica del metano para el cálculo de la temperatura de los productos es:



Donde el valor del coeficiente estequiométrico “a” dependerá de la relación aire combustible requerida para alcanzar la temperatura deseada, que corresponde a la de los productos.

Para la combustión de un mol de metano, se puede calcular el coeficiente “a” partiendo de la ecuación del balance de energía en un sistema reactivo a presión constante:

$$\Delta H_R^\circ + \int_{298}^{T_P} \left(\sum_i n_i C_{p_i} \right) dT - \int_{298}^{T_R} \left(\sum_j n_j C_{p_j} \right) dT = 0$$

⁸⁵ Seinfeld, John H. AIR POLLUTION. Pag. 80 - 83

Donde $\Delta H_R^\circ = \sum_P n_i \Delta h_{f,i}^\circ - \sum_R n_j \Delta h_{f,j}^\circ = \text{Calor de reacción estándar}$

$\Delta h_f^\circ = \text{Calor de formación del compuesto } i \text{ o } j$

$n = \text{Número de moles de reactivos o reactantes}$

T_R es la temperatura de los reactantes.

T_o es la temperatura a condiciones estándar = 298 K

C_p es la capacidad calorífica a presión constante.

Los subíndices R y P se utilizan para denominar a los reactantes y productos respectivamente.

Para obtener el coeficiente “a” en la ecuación anterior a diferentes temperaturas se utilizará el programa de computadora para cálculos termodinámicos que se anexa al texto de Termodinámica de Çengel Boles. Se anexa copia de la hoja de resultados para una temperatura de flama igual a 1300 K:

Complete combustion analysis for open system:

Fuel: CH4 Methane

Fuel temperature = 298.00 K Air temperature = 500.00 K

Adiabatic flame temp = 1300.00 K Product pressure = 0.600 MPa

CH4 + 6.00 O2 + 22.57 N2 ==>
1.00 CO2 + 2.00 H2O(g) + 4.00 O2 + 22.57 N2

Air-fuel ratio AFR = 51.60 kg of air/kg of CH4
= 28.57 kgmoles of air/kgmole of CH4

Mole fractions of product gases, based on total moles of gases:
XCO2 = 0.034 XH2O(g) = 0.068 XN2 = 0.763 XO2 = 0.135

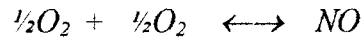
Dew point temp TDP = 349.40 K

Excess air = 200.14 %

Press any key to continue...(Cengel/Boles)

El resultado de la corrida presentada indica que el coeficiente estequiométrico para el oxígeno, el valor de “a”, es de 6.00.

El NO formado se puede calcular partiendo de la ecuación de equilibrio⁸⁶:



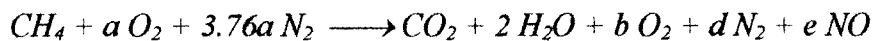
$$K = \frac{n_{NO}}{n_{O_2}^{1/2} n_{N_2}^{1/2}} \left(\frac{P_m}{n_m} \right)^{1/2} = 4.69 \text{Exp} \left(-\frac{10870.66}{T_p} \right)$$

Donde P_m = presión de la mezcla de productos de la combustión, en atmósferas.

n_m = moles totales de la mezcla de los productos de la combustión.

T_p = temperatura de los productos de combustión, en K.

La reacción de la combustión del metano incluyendo la formación de NO es:



La presión de la mezcla de los productos es de 6 bar = 5.29 atm.

Balance de nitrógeno:

$$3.76a = 2d + e \quad d = 3.76a - \frac{1}{2}e$$

Balance de oxígeno:

$$2a = 2 + 2 + 2b + e \quad b = a - 2 - \frac{1}{2}e$$

Los moles en la mezcla de productos de la combustión son:

$$n_m = 1 + 2 + b + d + e = 3 + (a - 2 - \frac{1}{2}e) + (3.76a - \frac{1}{2}e) + e = 1 + 4.76a$$

Sustituyendo en la ecuación de equilibrio:

$$K = \frac{e}{\left(a - 2 - \frac{e}{2} \right)^{1/2} \left(3.76a - \frac{e}{2} \right)^{1/2} \left(\frac{5.29}{1 + 4.76a} \right)^{1/2}} = 4.69 \text{Exp} \left(-\frac{10870.66}{T_p} \right)$$

Resolviendo esta ecuación para cada valor de "a", se obtienen los moles de NO en los productos de la combustión (coeficiente "e"). De esta manera se obtienen los valores del coeficiente "a", es decir, los moles de oxígeno necesarios para que al llevarse la combustión los productos salgan a la temperatura especificada y los moles de NO. En la tabla 4.1 se

⁸⁶ Seinfeld, John H. AIR POLLUTION. Pag. 81

presentan los resultados para diferentes temperaturas de los gases que entran a la turbina y en forma gráfica en la figura 4.6.

Temperatura (Tp, K)	Moles de oxígeno (a)	Moles de NO formados (e)
800	17.58	0.0008
900	12.95	0.0021
1000	10.15	0.0053
1100	8.3	0.0093
1200	6.99	0.0160
1300	6.00	0.0245
1400	5.24	0.0351
1500	4.63	0.0470
1600	4.14	0.0634
1700	3.73	0.0715
1800	3.38	0.0829
1900	3.08	0.0915
2000	2.83	0.0970

Tabla 4.1 Resultados del cálculo de la formación de NO en una turbina de gas que utiliza metano como combustible.

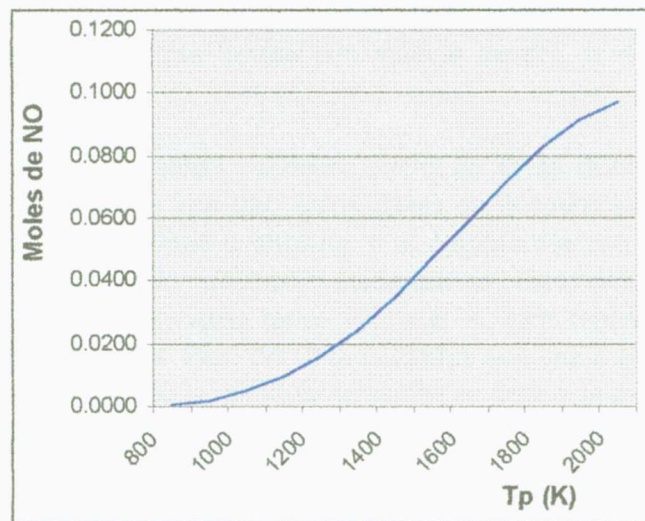


Figura 4.6 Formación de NO en función de la temperatura de los gases de entrada a la turbina.

En cuanto a las emisiones de CO₂ corresponderán a las reportadas en el capítulo 3, dependiendo del combustible utilizado, por lo que las acciones a tomar para disminuirlas también serán el uso de combustibles más limpios como es el gas natural o lograr mejoras en la eficiencia térmica del ciclo.

En cuanto a la cantidad de SO₂ emitida dependerá del contenido de azufre en el combustible que llega a la cámara de combustión. Este gas, y los NO_x son los contaminantes responsables del problema ambiental conocido como lluvia ácida.

4.3 Lluvia ácida

La lluvia ácida o deposición ácida se da cuando el pH del agua de la lluvia es menor a los valores que se dan en una atmósfera limpia debido a la contaminación por SO₂ y NO_x que en presencia de humedad producen ácido sulfúrico y ácido nítrico.

Para determinar si una sustancia es ácida o alcalina (básica) se utiliza el pH (potencial hidrógeno) con una escala del 0 al 14. El agua químicamente pura es neutral y tiene un pH igual a 7. Valores de pH menores a 7 indican acidez y mayores a 7 alcalinidad. Por tratarse de una escala logarítmica, entre cada valor hay un factor de diez veces, así, un pH de 6 es 10 veces más ácido que uno de 7, y un pH de 4 es 1000 veces más ácido que uno de 7. Cuando se disuelve una sustancia en el agua pura, su pH cambia, haciéndose ya sea ácida o alcalina.

El agua normal de lluvia es un poco ácida con un pH de 5.6 debido a la interacción de las gotas de agua con el CO₂ que normalmente se encuentra en la atmósfera. Sin embargo, en Norteamérica y Europa se registran lluvias con valores de pH de 4.0 y hasta de 3.0 en ocasiones⁸⁷.

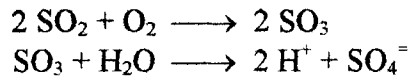
La lluvia ácida se presenta en zonas corriente abajo de áreas donde se emiten grandes cantidades de SO₂ y NO_x. Una vez que estos gases se encuentran en la atmósfera, se transforman en partículas de sulfatos o nitratos, y al combinarse con el vapor de agua, se transforman en soluciones de ácido sulfúrico y ácido nítrico. Estos ácidos se depositan en la tierra como humedad, niebla, llovizna, nieve y lluvia. A este fenómeno se le denomina también deposición ácida húmeda. Pero no toda la acidez que cae a la tierra proviene de la deposición ácida húmeda, cerca de la mitad de la acidez se debe a la deposición seca, que se da al depositarse gases y partículas que contienen los contaminantes mencionados sobre la tierra, las hojas de los árboles, edificios y otras superficies que al ser arrastradas por el agua de lluvia⁸⁸.

Los estudios realizados en torno al problema de la lluvia ácida en los estados Unidos revelan que del 60 al 70 % de la acidez se debe al ácido sulfúrico y del 30 al 40 % al ácido nítrico. La transformación del SO₂ en ácido, al entrar en contacto con las gotas de lluvia y ser absorbido, se puede representar por⁸⁹:

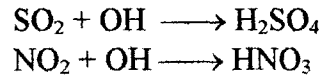
⁸⁷ Henry, J. Glynn et. al. ENVIRONMENTAL SCIENCE AND ENGINEERING. Pag. 122

⁸⁸ What is acid rain? Web

⁸⁹ Wark, Kenneth. CONTAMINACIÓN DEL AIRE, Origen y Control. Pag. 51



En fase gaseosa, las reacciones que dan origen a los ácidos nítrico y sulfúrico involucran el radical OH, en forma simplificada son⁹⁰:



El tiempo para que se dé la conversión de los contaminantes del aire a lluvia ácida puede tomar desde varias horas hasta varios días y se ven favorecidas por la luz solar. A partir de que se construyen chimeneas muy altas, los contaminantes se lanzan hacia partes altas de la atmósfera permaneciendo por largos períodos de tiempo en esta, dando más tiempo a que se lleven a cabo las reacciones químicas que llevan a la formación de la lluvia ácida. Adicionalmente, el viento arrastra los contaminantes a cientos o miles de kilómetros de sus fuentes, llevando el problema de acidez a regiones apartadas de las zonas industriales convirtiéndose en un problema de contaminación regional⁹¹, las emisiones de un país llegan a afectar a otro país como es el caso de las precipitaciones ácidas en Canadá por la contaminación generada en los Estados Unidos y muchos otros casos en Europa.

La presencia de SO₂ y NO_x en la atmósfera se debe a las emisiones provenientes del consumo de combustibles y de diversos procesos industriales como el caso de la metalúrgica. Las centrales de generación de energía eléctrica contribuyen con el 70% de las emisiones de SO₂ y 30 % de los NO_x en los Estados Unidos. Las fuentes móviles (transporte) también contribuyen con una parte importante de estas emisiones⁹².

4.3.1 Efectos nocivos de la lluvia ácida

El efecto más importante de la lluvia ácida sobre los sistemas acuáticos es la disminución en la población de peces, debido a envenenamiento por metales que se solubilizan por la acción de la lluvia ácida, especialmente el aluminio que en medios neutros o alcalinos es insoluble. Una vez disuelto el aluminio es sumamente tóxico, incluso a bajas concentraciones, para muchas formas de vida acuática⁹³. También hay una disminución en diversas especies como el zooplancton, algas, y plantas acuáticas provocando la ruptura en

⁹⁰ Seinfeld, John H, AIR POLLUTION. Pag. 708

⁹¹ Henry, J. Glynn, op. cit. Pag. 122-123

⁹² ENVIRONMENTAL BENEFITS, Acid Rain program. Web

⁹³ Henry, J. Glynn, op. cit. Pag. 127

la cadena alimenticia de los lagos. La reproducción de los peces se detiene con valores de pH menores a 5.5⁹⁴

Los bosques se ven beneficiados en principio por la lluvia ácida al recibir nutrientes nitrogenados y sulfatos, pero con el tiempo los nutrientes del suelo se van disolviendo y perdiendo por arrastre causando serios daños. Al parecer, el aluminio tiene efectos fitotóxicos al bloquear la absorción de nutrientes por las raíces. Los bosques situados en lugares elevados se ven afectados cuando quedan expuestos a neblinas ácidas que son incluso más ácidas que la lluvia⁹⁵, que se condensa en las hojas de los árboles recibiendo la solución ácida que las ataca disminuyendo su capacidad de llevar a cabo la fotosíntesis. En cuanto a los cultivos, los efectos dañinos de la lluvia ácida se atenúan por el uso de fertilizantes, pero aquellos cuyo producto principal es el follaje como la lechuga y el tabaco si se ven afectados. También la producción de semillas se ve disminuida causando pérdidas importantes a la economía agrícola⁹⁶.

La salud humana también se ve afectada por la lluvia ácida. Por ejemplo, al ingerir peces contaminados con metales pesados que absorbieron en su medio acuático. También por agua contaminada con metales pesados que han sido disueltos por aguas acidificadas al circular por tuberías metálicas (cobre, zinc, plomo, cadmio, etc.) y posteriormente se utilizan para consumo humano. Por otra parte, los precursores de la lluvia ácida, los aerosoles de sulfatos, son partículas que pueden ser inhaladas. Los altos niveles de estos aerosoles se asocian con el incremento en enfermedades y mortalidad por desórdenes pulmonares, tales como el asma y la bronquitis⁹⁷.

Otros problemas asociados con la lluvia ácida son problemas de corrosión en metales y deterioro de materiales de construcción de edificios, monumentos, esculturas, pintura de los edificios y de los automóviles. también las partículas de sulfatos en la atmósfera provocan problemas de reducción en la visibilidad.

Algunas medidas que pueden ayudar a resolver el problema de la lluvia ácida, son aquellas que ayuden a disminuir las emisiones de SO₂ y NO_x, ya que una vez en la atmósfera, no es posible su tratamiento o eliminación:

- Eliminar el azufre de los combustibles.
- Sustituir combustibles como el carbón y el combustóleo por otros más limpios con menor contenido de azufre como el gas natural.
- Instalar convertidores catalíticos en autos y chimeneas para convertir los NO_x en sustancias inocuas, como el nitrógeno.

⁹⁴ Wark, Kenneth, CONTAMINACIÓN DEL AIRE. Pag. 54

⁹⁵ Effects of Acid rain on Forest, Web

⁹⁶ Henry, J. Glynn, op. cit. pag. 133

⁹⁷ Environmental Benefits, Web

- Instalar sistemas de tratamiento de los gases de chimenea. Al pasar los gases de escape por una solución de carbonato de calcio se puede eliminar alrededor del 90% del SO_2 ⁹⁸.

4.4 Mejoras al ciclo Brayton y a la eficiencia térmica

En el ciclo Brayton las irreversibilidades en la turbina y el compresor ejercen un efecto más marcado en la disminución de la eficiencia que en el ciclo Rankine debido al elevado consumo de potencia por el compresor. La eficiencia adiabática de la turbina se define de igual forma que en el caso del ciclo Rankine, y la del compresor en forma similar a la de la bomba. En la figura 4.7 se pueden observar los estados del ciclo Brayton irreversible, que corresponden a los estados 2' y 4'.

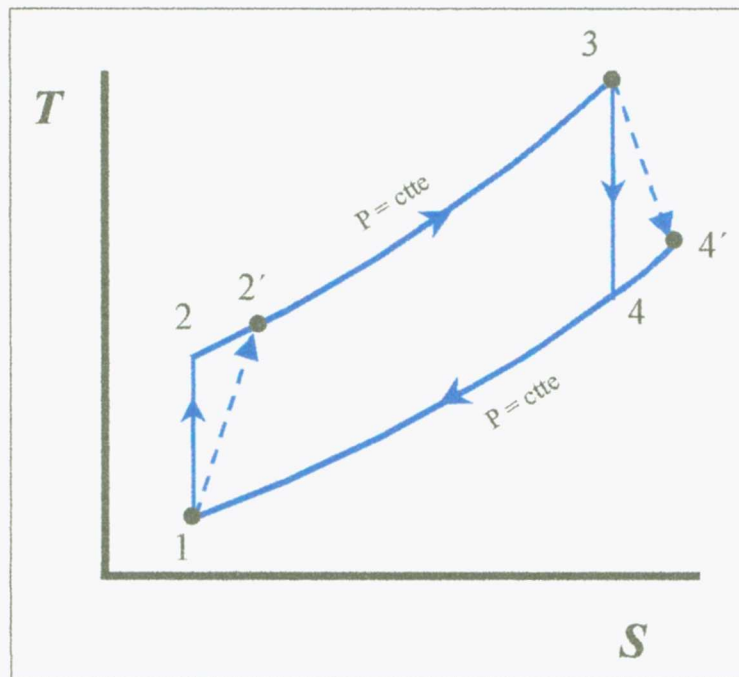


Figura 4.7 Ciclo Brayton con expansión y compresión irreversibles.

$$\text{Eficiencia adiabática del compresor} - \eta_c = \frac{W_{\text{isoentrópica}}}{W_{\text{Real}}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2'}$$

Entonces la eficiencia térmica del ciclo irreversible es:

⁹⁸ Fulkerson, William. Energy From Fossil Fuels. Scientific American. Pag. 85

$$\eta_{irrev.} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

Debido a las irreversibilidades la temperatura de los gases a la salida del compresor aumenta con el aparente beneficio de disminuir la adición de calor al ciclo, pero a la salida de la turbina la temperatura es mayor, lo que implica que se estará rechazando más calor, dando como resultado una disminución importante en la eficiencia térmica. Para compensar este efecto negativo, se implementa una serie de modificaciones al ciclo con miras a mejorar su eficiencia térmica.

4.4.1 Ciclo regenerativo de turbina de gas.

Además de que la eficiencia térmica del ciclo disminuye debido a las irreversibilidades en la turbina y el compresor, los gases a la salida de la turbina tendrán una temperatura mayor que en el ciclo reversible, por lo que es necesario aprovechar el contenido energético de estos gases antes de enviarlos a la atmósfera que es su sumidero natural. Para lograrlo, se emplea un recuperador de calor o regenerador en el cual se precalienta la corriente de aire que va hacia el quemador, ayudando de esta manera a que el consumo de combustible disminuya.

En la figura 4.8 se muestra el ciclo Brayton regenerativo en el que se ha insertado un intercambiador de calor para lograr la transferencia de calor entre los dos fluidos y se presenta también su correspondiente diagrama T-S en el que se muestra con líneas a trazos el efecto de las irreversibilidades en la turbina y el compresor.

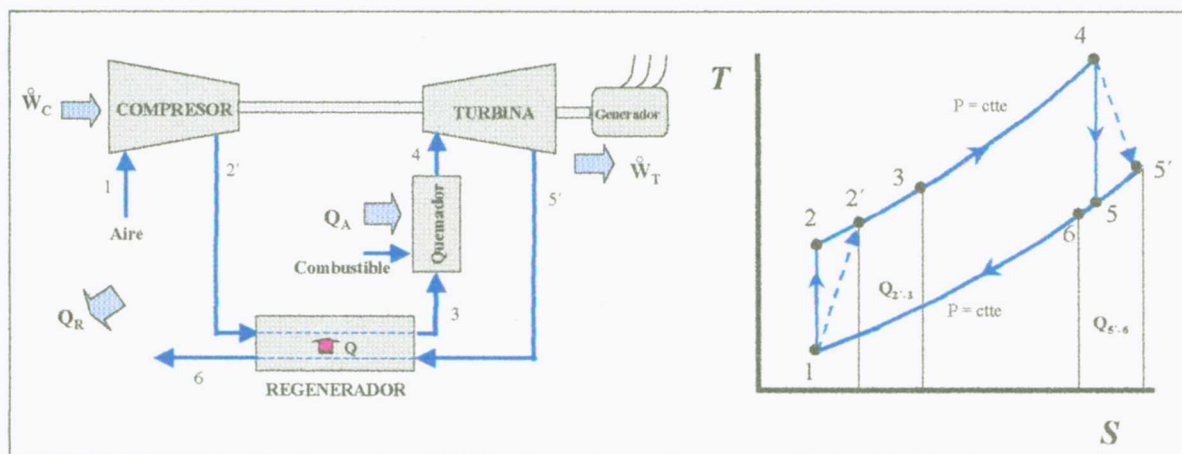


Figura 4.8 Ciclo Brayton con regeneración. Los estados 2' y 5' son los estados reales, 2 y 5 son los adiabáticos reversibles.

El ahorro de energía en este ciclo se representa por el área sombreada de la gráfica bajo el proceso 2'-3 y que es igual al área bajo 5'-6, ya que representan el calor intercambiado en el regenerador. Es evidente que mientras mayores sean estas áreas, mayor será el ahorro en combustible en el quemador, por lo que es deseable que el regenerador sea lo más eficiente posible. Así, en este caso el calor añadido será solamente durante el trayecto de 3 a 4 y el calor rechazado de 6 a 1.

La eficiencia o efectividad del regenerador se define como la relación del calor real que se intercambia entre el calor máximo que podría ser intercambiado. Se toma la corriente que va del compresor al quemador para medir el calor que se intercambia.

El calor real intercambiado en el regenerador se puede obtener a partir de un balance de energía en la corriente de 2' a 3:

$$Q + W = \Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p$$

Como no hay trabajo en el eje y la energía cinética y potencial son despreciables, el calor intercambiado se calcula con el cambio de entalpías, de tal forma que la efectividad del regenerador queda como:

$$\text{Efectividad} = \eta_{Ef} = \frac{Q_{Real}}{Q_{Máximo}} = \frac{h_3 - h_{2'}}{h_{5'} - h_{2'}}$$

Haciendo un balance de energía en el regenerador se obtiene:

$$\dot{Q} + \dot{W}_{Eje} = \sum_{Sale} \dot{m}(h + e_c + e_p) - \sum_{Entra} \dot{m}(h + e_c + e_p)$$

En este caso, no hay interacciones de calor del regenerador con los alrededores ni de trabajo en el eje y la energía cinética y la potencial son despreciables, por lo que el balance queda:

$$\sum_{Entra} \dot{m} h = \sum_{Sale} \dot{m} h$$

Y como los flujos másicos de entrada y salida son iguales, entonces:

$$h_{2'} + h_{5'} = h_3 + h_6, \text{ es decir, } h_{2'} - h_3 = h_6 - h_{5'}$$

Lo que equivale a $Q_{2'.3} = -Q_{5'.6}$

Si se quieren lograr valores muy altos de efectividad será necesario disponer de un regenerador de grandes dimensiones que podría llegar a ser incoachable.

La eficiencia térmica para el ciclo regenerativo será entonces:

$$\eta = 1 - \frac{Q_R}{Q_A} = 1 - \frac{h_6 - h_1}{h_4 - h_3}$$

El efecto que tiene la regeneración en la eficiencia del ciclo Brayton se puede estimar considerando el ciclo con aire normal y tomando C_p y C_v constantes. Haciendo las operaciones necesarias se puede expresar la eficiencia como:

$$\eta = 1 - \frac{C_p(T_6 - T_1)}{C_p(T_4 - T_3)} = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_p^{(k-1)/k}$$

La expresión anterior implica que al contrario de lo que sucede con el ciclo Brayton simple, en este caso al incrementarse la relación de presiones, la eficiencia térmica del ciclo regenerativo tenderá a disminuir y aumentará conforme aumente la relación T_4/T_1 , por lo que conviene tener bajas relaciones de presión y altas temperaturas a la entrada de la turbina (T_4), ya que la temperatura del aire a la entrada del compresor será la del ambiente. Esto también indica que la efectividad del regenerador deberá ser lo más alta posible para disminuir la adición de calor en el quemador para lograr la temperatura deseada. Por otro lado, la temperatura de entrada a la turbina estará restringida por los materiales de esta como ya se comentó anteriormente.

El efecto de la regeneración en la eficiencia térmica se puede ver gráficamente en la figura 4.9.

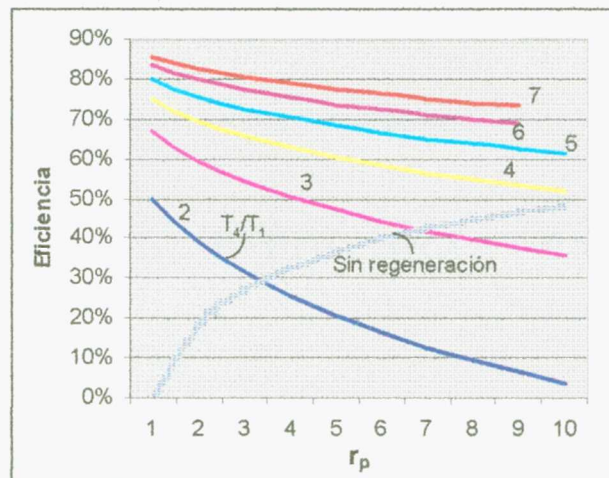


Figura 4.9 Efecto de la regeneración en un ciclo Brayton.

De la gráfica anterior se puede concluir que para aumentar la eficiencia térmica conviene trabajar con la menor relación de presión posible y la mayor relación de temperaturas entre

la entrada a la turbina y la entrada del compresor. El inconveniente de utilizar relaciones de presiones muy bajas es que el trabajo que entregaría el ciclo sería muy bajo, y en el límite, cuando r_p tienda a cero, el trabajo neto del ciclo también. Sin embargo, se puede notar que la eficiencia térmica cambia poco al aumentar la relación de presiones cuando la relación de temperaturas es alta como es el caso de $T_4/T_1 = 7$.

En la medida en que se logre que el material de las turbinas resista mayores temperaturas, será posible trabajar con mayores relaciones de presiones y lograr tanto altas eficiencias térmicas como mayores potencias de salida del ciclo.

El efecto de las irreversibilidades y la regeneración en la eficiencia térmica se puede ilustrar tomando como ejemplo un ciclo que trabaja bajo las siguientes condiciones de operación:

Temperatura del aire a la entrada del compresor $T_1 = 298 \text{ K}$.

Relación de presiones $r_p = 6$

Rango de la temperatura del aire a la entrada de la turbina igual al utilizado en el cálculo de las emisiones de NO, de 800 a 1600 K.

La numeración de los diferentes estados es de acuerdo a las figuras 4.1, 4.7 y 4.8 para el ciclo ideal, el irreversible y el regenerativo respectivamente.

La eficiencia del ciclo ideal es:
$$\eta = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

Los valores de las entalpías se pueden obtener de las tablas del aire en función de la temperatura.

A $T_1 = 298 \text{ K}$, $h_1 = 298.18 \text{ kJ/kg}$

La temperatura 2 se obtiene de las relaciones isoentrópicas:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = (r_p)^{\frac{k-1}{k}} \quad T_2 = (298)(6)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 497 \text{ K} \approx 500 \text{ K}$$

Por lo que $h_2 = 503.02 \text{ kJ/kg}$

La temperatura 3 corresponde a las diferentes temperaturas de entrada a la turbina, y T_4 se obtiene en forma similar a T_2 .

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{1}{r_p} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad T_4 = T_3 \left(\frac{1}{6} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 0.6T_3$$

T ₃	T ₄	h ₃	h ₄	η
800	480	821.95	482.49	42%
900	540	932.93	544.35	43%
1000	599	1046.04	607	43%
1100	660	1161.07	670.47	43%
1200	720	1277.8	734.82	44%
1300	780	1395.97	800.03	44%
1400	840	1515.42	866.08	44%
1500	900	1635.97	932.93	44%
1600	960	1757.57	1000.55	44%

Para el ciclo con irreversibilidades en la turbina y el compresor:

$$\eta_{irrev.} = 1 - \frac{h_4' - h_1}{h_3 - h_2'}$$

De las eficiencias adiabáticas de la turbina y el compresor:

$$h_4' = h_3 - \eta_T (h_3 - h_4)$$

$$h_2' = h_1 - \frac{h_1 - h_2}{\eta_C} = 298.18 - \frac{298.18 - 53.02}{0.85} = 539.17$$

Sustituyendo los datos de la tabla anterior con el nuevo valor de h_{2'} y para valores de eficiencia adiabática del compresor y de la turbina de 0.85 y 0.87 respectivamente se obtienen los siguientes resultados:

T ₃	h _{4'}	η _{irrev}
800	526.6	19%
900	594.9	25%
1000	664.1	28%
1100	734.2	30%
1200	805.4	31%
1300	877.5	32%
1400	950.5	33%
1500	1024.3	34%
1600	1099.0	34%

Para el ciclo regenerativo se tomará la efectividad del regenerador igual a 0.8, y las mismas eficiencias adiabáticas en la turbina y el compresor:

$$\eta_{reg.} = 1 - \frac{h_6 - h_1}{h_4 - h_3}$$

Los subíndices corresponden a los estados señalados en el diagrama de la figura 4.8, solamente los estados 1, 2 y 2' corresponden a los mismos del caso anterior.

A partir de la definición de la efectividad del regenerador:

$$h_3 = \eta_{ef} (h_{5'} - h_{2'}) + h_{2'}$$

Y del balance de energía en el regenerador:

$$h_6 = h_{2'} + h_{5'} - h_3$$

Sustituyendo datos y calculando las entalpías, se obtienen los siguientes resultados:

T_3	h_3	h_6	$\eta_{reg.}$
800	529.13	536.66	19%
900	583.73	550.31	28%
1000	639.09	564.15	35%
1100	695.23	578.18	40%
1200	752.16	592.42	44%
1300	809.84	606.84	47%
1400	868.23	621.43	50%
1500	927.29	636.20	52%
1600	987.00	651.13	54%

Como se puede ver en la gráfica 4.10 en la que se presentan los resultados de los tres casos, las irreversibilidades provocan una caída importante en la eficiencia térmica del ciclo, sin embargo, la regeneración es una buena opción para incrementar la eficiencia térmica a pesar de las irreversibilidades. Se pueden hacer aún mejoras al ciclo, disminuyendo el trabajo absorbido por el compresor e incrementando el que entrega la turbina mediante el enfriamiento intermedio o compresión en múltiples etapas y el recalentamiento o expansión en múltiples etapas.

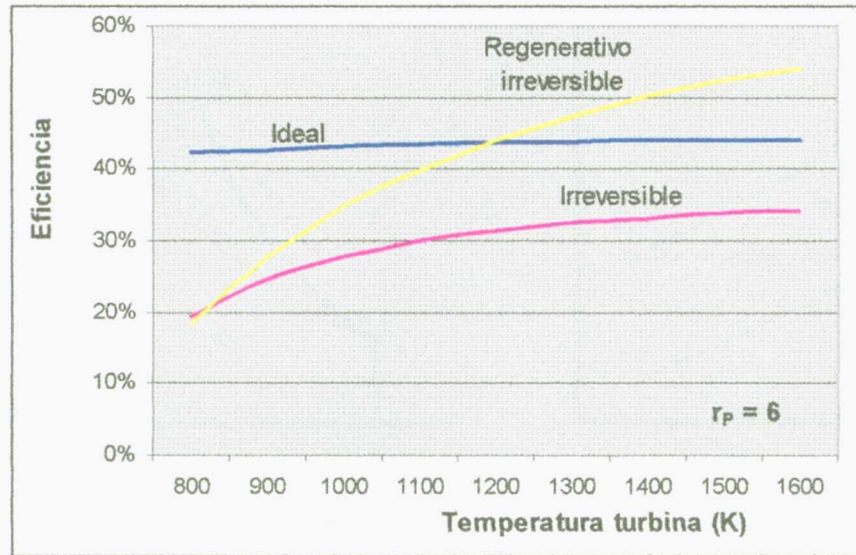


Figura 4.10 Eficiencia térmica de un ciclo de turbina de gas para tres situaciones diferentes, ciclo ideal simple, ciclo simple con irreversibilidades y ciclo regenerativo con irreversibilidades.

4.4.2 Ciclo de turbina de gas con enfriamiento intermedio y recalentamiento.

Una forma de aumentar el trabajo neto entregado por el ciclo es disminuyendo la potencia absorbida por el compresor. Los factores que afectan el consumo de trabajo por el compresor son el volumen y la presión del gas de acuerdo a la expresión para un sistema abierto de flujo constante:

$$W_C = \int_{P_1}^{P_2} v dP$$

Para un intervalo de presiones dado hay que buscar la forma de disminuir el volumen del gas durante la compresión y como el volumen depende de la temperatura y la presión entonces lo que conviene es enfriar el gas para mantener el volumen lo más bajo posible. En la figura 4.11 se observa claramente que el trabajo requerido para la compresión es menor en un proceso isotérmico que en uno adiabático reversible o isoentrópico. Cualquier proceso intermedio entre estos dos será un proceso politrópico.

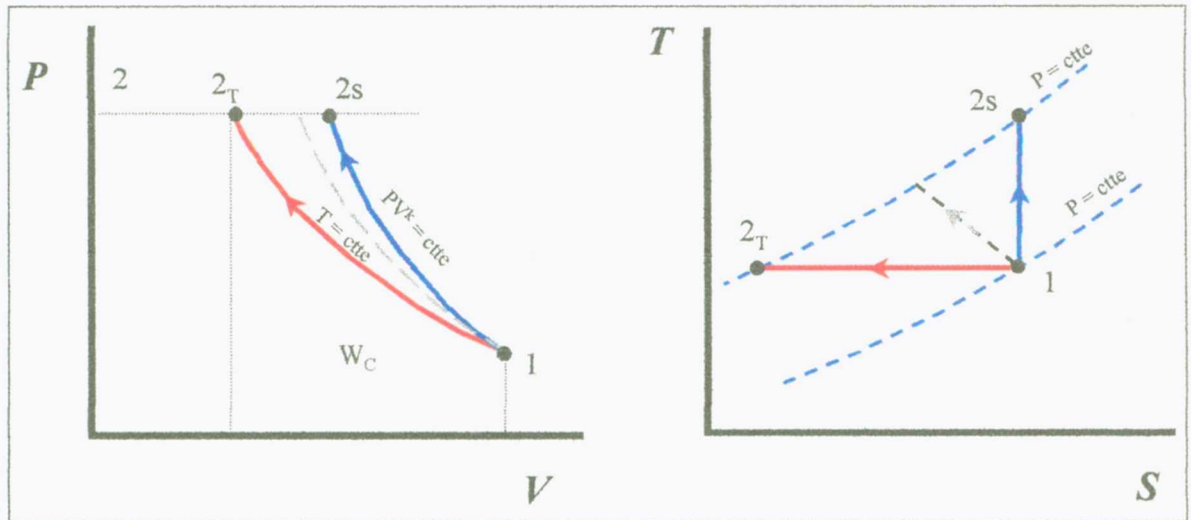


Figura 4.11 Diagramas P-V y T-S para un proceso de compresión.

El compresor absorbe menos trabajo durante un proceso isotérmico (1-2_T) que en uno adiabático reversible o isentrópico (1-2_s). El área formada por 1-2_s-2_T representa el trabajo adicional requerido cuando la compresión es isentrópica en lugar de ser isotérmica. El proceso politrópico es intermedio entre el isentrópico y el isotérmico (línea a trazos).

Para lograr que la compresión sea isotérmica, o por lo menos lo más cercano, el gas se comprime parcialmente en un compresor, enseguida se pasa por un enfriador (intercambiador de calor) que en el caso ideal el gas se enfría hasta la temperatura inicial, se envía a una segunda etapa de compresión, otro enfriador y así sucesivamente hasta alcanzar la presión de trabajo del ciclo. A esta serie de procesos se le conoce como compresión en múltiples saltos o etapas.

Las presiones intermedias a las cuales se realicen las extracciones deberán ser aquellas que optimicen el trabajo consumido por el compresor, es decir, que lo minimicen.

El trabajo de compresión que se obtiene del balance de energía se puede expresar en función de las presiones de entrada y salida y considerando el caso de que C_p y C_v sean constantes:

$$W_C = h_2 - h_1 = C_p (T_2 - T_1) = \frac{k}{(k-1)} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} - 1 \right]$$

En el caso de un proceso politrópico, el exponente k se sustituye por el exponente de $PV^n = \text{cte}$.

Para un proceso de compresión en dos saltos o etapas en el que la presión intermedia es P_x , el trabajo total consumido por el compresor será:

$$W_C = W_1 + W_2 = \frac{k}{(k-1)} \left[\left(\frac{P_X}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] + \frac{k}{(k-1)} \left[\left(\frac{P_2}{P_X} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Para Obtener el trabajo de compresión mínimo se procede a derivar la expresión anterior respecto a la presión intermedia P_X e igualar a cero, dando como resultado que la presión intermedia óptima es:

$$P_X = \sqrt{P_1 P_2}$$

En la figura 4.12 se muestran los diagramas P-V y T-S para la compresión ideal en dos etapas, la temperatura después del enfriamiento intermedio es igual a la de entrada al compresor de la primera etapa.

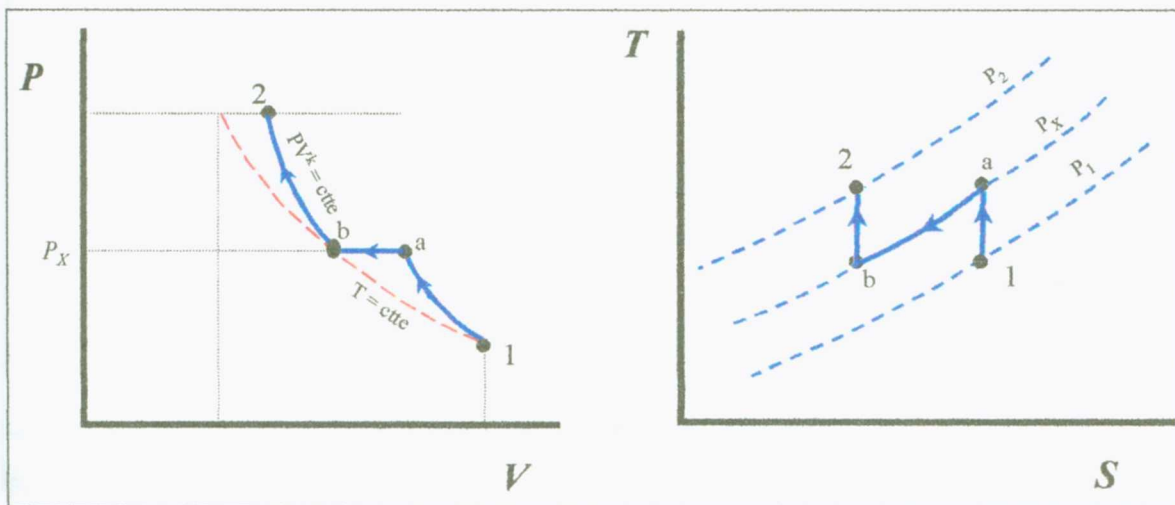


Figura 4.12 Compresión ideal con enfriamiento intermedio en dos etapas.

Otra forma de aumentar el trabajo o potencia que entrega el ciclo de turbina de gas es realizando la expansión en la turbina también en múltiples saltos o etapas. En este caso, el gas se expande parcialmente en una primera turbina hasta una presión intermedia, enseguida se lleva a una segunda cámara de combustión, que en el caso ideal el gas sale a la misma temperatura que salió de la primera cámara de combustión. El gas se expande en otra turbina y así sucesivamente hasta la presión de descarga.

Las presiones intermedias se obtienen en forma similar que en el caso de la compresión en múltiples etapas, pero en este caso maximizando el trabajo entregado por la turbina.

En el caso de una expansión en dos etapas, en la que el gas pasa desde una presión P_1 hasta P_2 , la presión intermedia óptima es igual a:

$$P_X = \sqrt{P_1 P_2}$$

De esta manera se puede mejorar el ciclo de turbina de gas llevando a cabo la compresión y la expansión en múltiples saltos o etapas. Pero en este caso será indispensable el uso de un regenerador ya que al final de la compresión en este caso, el gas saldrá a menor temperatura que en el caso de una sola etapa, por lo que sería necesario añadir más calor para alcanzar la temperatura de operación. Y por otro lado, los gases después de la última etapa de expansión también tendrán una temperatura mayor a la que se tendría con una sola etapa. Por estos motivos, el regenerador ayudará por un lado a recuperar el contenido energético de los gases de descarga de la turbina y por otro evitar un consumo excesivo de combustible al precalentar los gases que salen de la última etapa del compresor. En la figura 4.13 se presenta el esquema de un ciclo de turbina de gas regenerativo con enfriamiento intermedio y recalentamiento, dos saltos en la compresión y dos en la expansión.

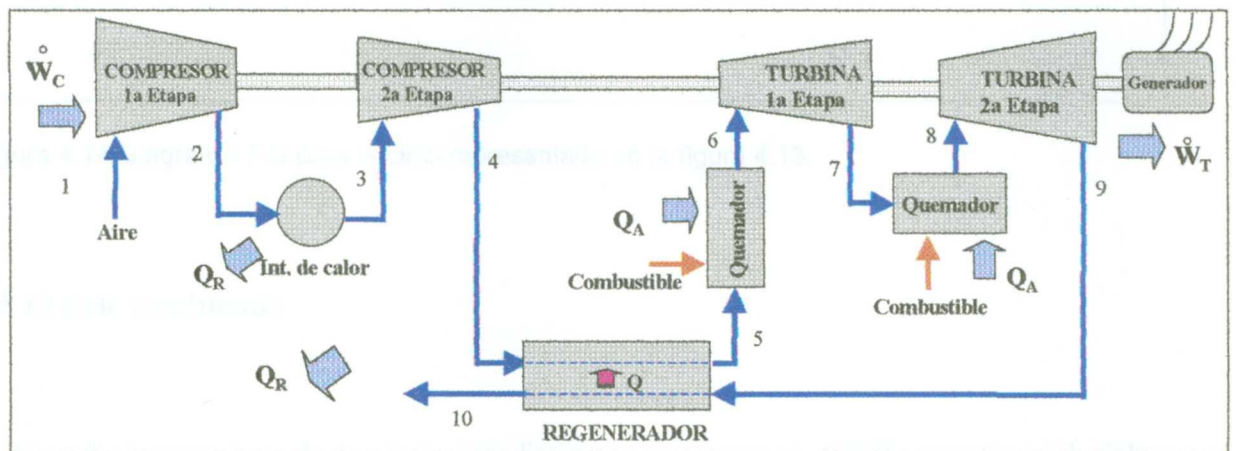


Figura 4.13 Ciclo de turbina de gas con enfriamiento intermedio, recalentamiento y regeneración.

El diagrama T-S correspondiente al ciclo de la figura 4.13 se presenta en la figura 4.14.

Conforme se aumenta el número de etapas de compresión y de expansión, se logrará el máximo trabajo entregado por el ciclo, ya que ambos procesos se aproximarían a los isotérmicos.

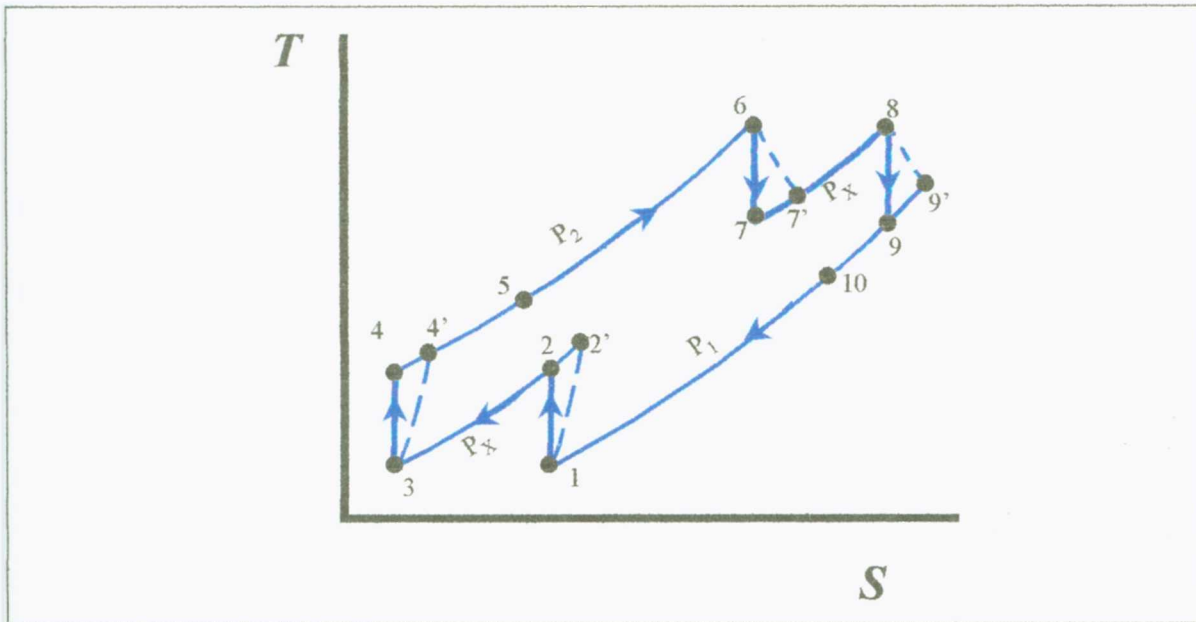


Figura 4.14 Diagrama T-S para el ciclo representado en la figura 4.13.

4.5 El ciclo combinado

Uno de los motivos de los bajos rendimientos, menores al 40%⁹⁹, que tiene el ciclo Brayton es a que la temperatura de los gases de descarga es relativamente alta, desperdiándose grandes cantidades de energía que se disipan en la atmósfera. Del contenido energético de los gases calientes que salen de la turbina se puede estimar que porción puede ser convertida aún en trabajo mediante un análisis de disponibilidad y así determinar si es conveniente o no intentar recuperar esa energía.

La disponibilidad se refiere al máximo trabajo que se podría obtener de un sistema cuando éste pasa de un estado dado de equilibrio a otro. En el caso de sistema abiertos, como es el que se está tratando, la disponibilidad (ψ) se puede calcular mediante:

$$\Delta\Psi = (h_2 + e_{c2} + e_{p2} - T_o s_2) - (h_1 + e_{c1} + e_{p1} - T_o s_1)$$

Donde T_o es la temperatura de los alrededores. Si el cambio en la energía cinética y potencial son despreciables:

$$\Delta\Psi = (h_2 - T_o s_2) - (h_1 - T_o s_1) = (h_2 - h_1) - T_o (s_2 - s_1)$$

⁹⁹ Wark, Termodinámica. Pag. 761

Este resultado es igual al calor disponible (Q_D) durante el proceso de rechazo de calor del ciclo, es decir, nos indica la cantidad del calor rechazado que puede convertirse en trabajo si se alimenta con éste una máquina térmica ideal, parte lo convierte en trabajo y el calor restante o calor no-disponible (Q_{ND}) lo elimina a la temperatura de los alrededores. En la figura 4.15 se muestra en el diagrama T-S la parte del calor que es disponible correspondiente al área sombreada señalada con Q_D , y la parte no disponible del calor indicada con Q_{ND} .

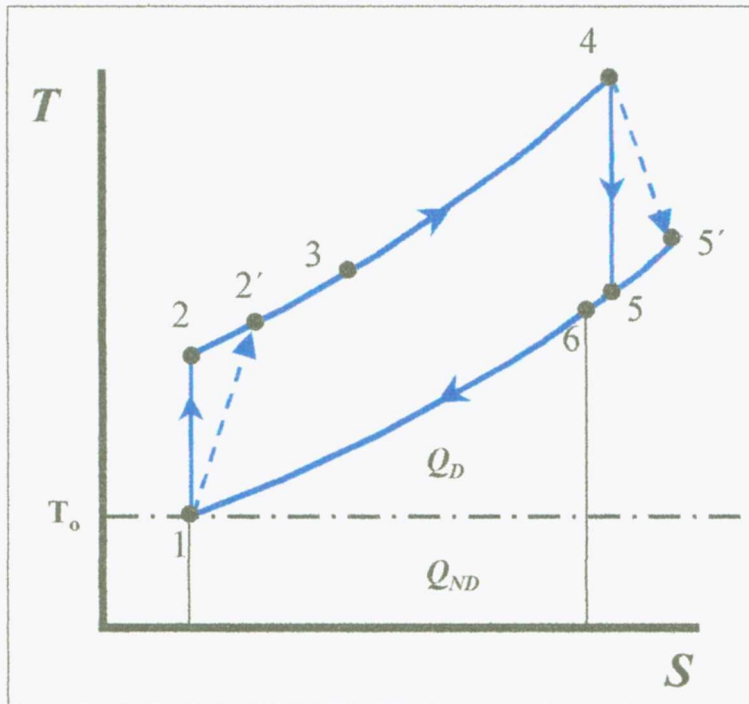


Figura 4.15 Calor disponible en el proceso de rechazo de calor del ciclo Brayton. El área sombreada correspondiente a Q_D indica la porción del calor rechazado que teóricamente puede convertirse en trabajo.

Tomando como ejemplo los resultados del ciclo Brayton simple irreversible y el ciclo regenerativo que se presentó en 4.4.1. Tomando el caso en el que la temperatura del aire a la entrada a la turbina es de 1300 K:

Los valores de entropía se pueden calcular de la ecuación:

$$s = s^\circ - R_u \ln(P)$$

El valor de S° se obtiene de las tablas de aire conociendo la temperatura y el segundo término se anula al realizar la resta con el otro valor de entropía ya que el proceso es a presión constante.

Para el ciclo simple irreversible:

$$s_4 - s_1 = s_4^\circ - s_1^\circ - R_u \ln \left(\frac{P_4}{P_1} \right)$$

De las tablas de aire se obtiene con $T_1 = 298 \text{ K}$, $s_1^\circ = 1.6953 \text{ kJ/kg.K}$

En el estado 4' con $h_{4'} = 877.5$, $T_{4'} = 1136 \text{ K}$ y $s_{4'}^\circ = 3.1147 \text{ kJ/kg.K}$

$$\text{Por lo que } \Delta\psi = 877.5 \text{ kJ/kg} - 298.18 \text{ kJ/kg} - (298 \text{ K})(3.1147 - 1.6953) \text{ kJ/kg.K} = 156.34 \text{ kJ/kg}$$

Es decir, por cada kg de gas en el ciclo, se desperdicia la oportunidad de generar 156.34 kJ de energía en forma de trabajo. Comparándolo con el calor total rechazado:

$$Q_R = h_{4'} - h_1 = 877.5 - 298.18 = 579.32 \text{ kJ/kg}$$

El porcentaje de Q_R que puede transformarse en trabajo es:

$$\% = \frac{\Delta\psi}{Q_R} \times 100 = \frac{156.34}{579.32} \times 100 = 27\%$$

Es decir, del calor rechazado aún es posible convertir un 27% de este en energía útil.

Si se compara ahora con el trabajo neto que entrega el ciclo que es igual a $Q_A - Q_R$:

$$Q_A = h_3 - h_{2'} = 1395.7 - 539.17 = 856.8 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_R = h_{4'} - h_1 = 877.5 - 298.18 = 579.32 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{neto} = 856.8 - 579.32 = 277.48 \text{ kJ/kg}$$

$$\% = \frac{\Delta\psi}{W_{neto}} \times 100 = \frac{\Delta\psi}{Q_A - Q_R} \times 100 = \frac{156.34}{277.48} \times 100 = 56.3\%$$

Este resultado indica que se está desperdiciando en energía el equivalente a más de la mitad del trabajo o la potencia neta entregada por el ciclo al desechar los gases calientes hacia la atmósfera. ¡Por cada 100 MW de potencia se podrían generar otros 56.3 MW adicionales!

En el ciclo regenerativo, el desperdicio de energía es menor ya que parte de la energía de los gases de salida de la turbina se regresa al ciclo, efecto que se distingue en el incremento de la eficiencia térmica del ciclo regenerativo respecto al ciclo simple.

En el caso del ciclo regenerativo, el calor rechazado es del estado 6 al estado 1, por lo que la disponibilidad durante este proceso es igual a:

$$\Delta\Psi = (h_6 - h_1) - T_o(s_6 - s_1)$$

$$\Delta\psi = 606.8 \text{ kJ/kg} - 298.18 \text{ kJ/kg} - (298\text{K})(2.4 - 1.6953) \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} = 98.62 \text{ kJ/kg}$$

Con respecto al trabajo neto del ciclo, que es igual tanto en el ciclo simple como en el regenerativo, equivale a:

$$\% = \frac{\Delta\Psi}{W_{neto}} \times 100 = \frac{98.62}{277.48} \times 100 = 35.5\%$$

La disminución en el porcentaje de energía no aprovechada con respecto al ciclo simple se debe a que en el ciclo regenerativo el calor rechazado es menor.

Una forma de aprovechar el contenido energético de los gases calientes que salen de una turbina de gas es utilizarlos como fuente de suministro de calor hacia una máquina térmica, que en el caso ideal sería una de Carnot, y que en la práctica se utiliza un ciclo Rankine. En este caso la caldera se alimenta con los gases provenientes de la turbina de gas para la producción de vapor. De esta manera se logra aumentar la eficiencia térmica en cuanto al aprovechamiento de los combustibles para la obtención de potencia. en la figura 4.16 se muestra un esquema de un ciclo combinado, el ciclo superior es Brayton y el ciclo inferior es el Rankine simple.

En el ciclo Brayton ya no habrá necesidad de utilizar un regenerador, porque los gases calientes van hacia la caldera del ciclo Rankine. Para el adecuado funcionamiento del ciclo Rankine puede llegar a ser necesario añadir calor adicional al de los gases de escape de la turbina de gas inyectando combustible a la corriente de los gases provenientes de la turbina y haciéndolo pasar por un quemador.

Los gases calientes provenientes de plantas de potencia movidas por motores de combustión interna se pueden aprovechar también en ciclos combinados en los que el ciclo inferior trabaje con un fluido de bajo punto de ebullición como pueden ser los freónes, el amoníaco o hidrocarburos de bajo peso molecular. También puede aprovecharse el calor sobrante del ciclo combinado en aplicaciones de cogeneración como se verá más adelante.

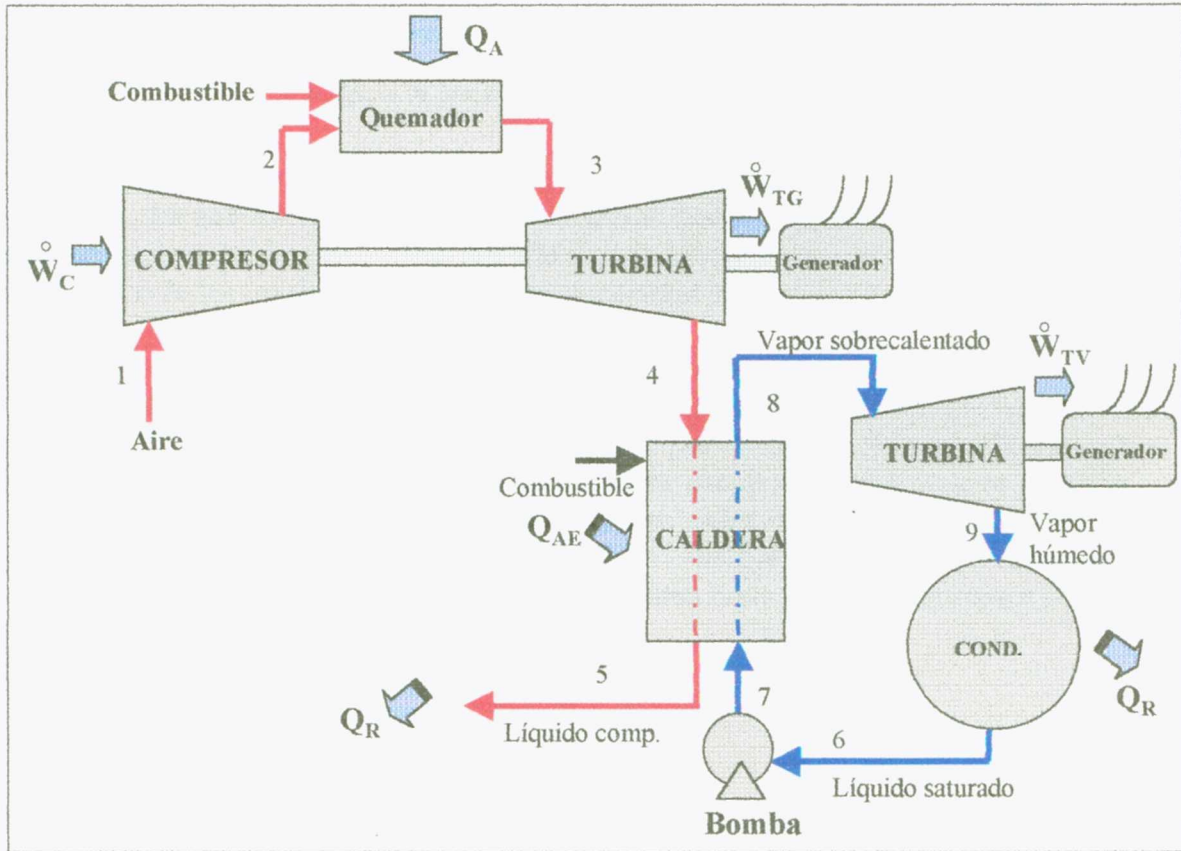


Figura 4.16 Ciclo combinado formado por los ciclos Brayton y Rankine sencillos.

La eficiencia térmica del ciclo combinado se obtiene a partir de su definición. De acuerdo al diagrama de la figura 4.16, el calor se añade al ciclo en el quemador antes de la turbina de gas en el ciclo superior (Q_A) y en algunos casos en la caldera del ciclo inferior (Q_{AE}). El rechazo de calor se lleva a cabo en el condensador del ciclo inferior ($Q_{R\ 9-6}$) y en la descarga de los gases provenientes de la turbina de gas después de haber pasado por la caldera ($Q_{R\ 5-1}$).

$$\eta = 1 - \frac{Q_R}{Q_A} = 1 - \frac{Q_{R9-6} + Q_{R5-1}}{Q_A + Q_{AE}} = 1 - \frac{\dot{m}_v(h_9 - h_6) + \dot{m}_g(h_5 - h_1)}{\dot{m}_g(h_3 - h_2) + Q_{AE}}$$

Donde \dot{m}_v = flujo másico de vapor en el ciclo Rankine.

\dot{m}_g = flujo másico de gas en el ciclo Brayton.

La potencia neta entregada por el ciclo combinado corresponde a la suma de los trabajos de las dos turbinas menos la potencia absorbida por el compresor y por la bomba:

$$W_{neto} = W_{TG} + W_{TV} - W_C - W_B$$

$$W_{neto} = \dot{m}_g [(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)] + \dot{m}_v [(h_8 - h_9) - (h_7 - h_6)]$$

En la literatura se reportan valores de eficiencia térmica alrededor del 50% para los ciclos combinados, lo que hace de estos ciclos la mejor opción para alcanzar los objetivos planteados en cuanto al aprovechamiento eficiente de los recursos energéticos no renovables y disminución de las emisiones contaminantes por unidad de energía producida.

En las nuevas tecnologías en turbinas de gas se aprovechan las ventajas de las turbinas de transporte aéreo y las estacionarias, logrando equipos de alto desempeño. Tal es el caso de las turbinas de gas de las series 3A desarrolladas por Siemens, de las cuales reporten eficiencias térmicas del 38% trabajando en un ciclo simple de Brayton, y se llegarán a alcanzar eficiencias netas de hasta 58% trabajando en ciclos combinados. No solamente se logran excelentes eficiencias térmicas, también incluye sistemas de combustión avanzados (para gas natural y combustóleo) que permiten bajas emisiones de NO_x y CO¹⁰⁰.

4.6 Cogeneración

La cogeneración es una alternativa en la que se promueve el aprovechamiento del calor de desecho de los ciclos de potencia. Este calor de desecho, debido a su baja calidad (baja temperatura), no es convertible a energía eléctrica y generalmente termina en un sumidero natural. Sin embargo, se puede aprovechar parte de este calor generando simultáneamente energía eléctrica y calor para algún proceso industrial o como fuente de calefacción en una zona residencial antes de desecharlo. Es muy útil cuando se trata de procesos industriales que consumen altos volúmenes de vapor y de energía eléctrica, como es el caso de las fábricas de papel, cervecera, fibras textiles, alimenticia, etc. También en lugares donde por el clima requieran de calefacción o en clubes deportivos.

Una de las grandes ventajas del sistema de cogeneración es que en la producción simultánea de calor y electricidad se consume alrededor de un 30% menos de combustible que si se produjeran en forma separada.¹⁰¹

Los sistemas de cogeneración no son nuevos, pero en México estaba limitada su instalación en plantas industriales, sin embargo, a partir de diciembre de 1992, de acuerdo con el Diario Oficial de la Federación, se permite y estimula que el particular genere su propia energía eléctrica y el excedente, si lo hay, lo puede vender a la CFE.

¹⁰⁰ Becker, Bernard et. al. A New Generation of Gas Turbines. Siemens Review. Pag. 7-10

¹⁰¹ Energy Efficiency in Industrial Technologies. Web

Los sistemas de cogeneración se clasifican dependiendo del orden en que se producen la energía eléctrica y el calor de proceso, siendo estos los sistemas primarios (topping) y secundarios (bottoming).

En los sistemas primarios se produce primero la electricidad ya sea mediante un ciclo Rankine, uno de turbina de gas o motores de combustión interna, y el calor de desecho es el que se utiliza como fuente de energía térmica para algún proceso industrial o para calefacción.

Los sistemas secundarios son aquellos que utilizan el calor de desecho de algún proceso mediante un recuperador de calor donde se produce el vapor que primero impulsa una turbina y posteriormente se utiliza en el proceso. Aunque la configuración del sistema siempre se tendrá que ajustar a las condiciones particulares del proceso y se podrán encontrar variantes a los sistemas primario y secundario.

En la figura 4.17 se puede ver un esquema sencillo de los dos sistemas básicos de cogeneración.

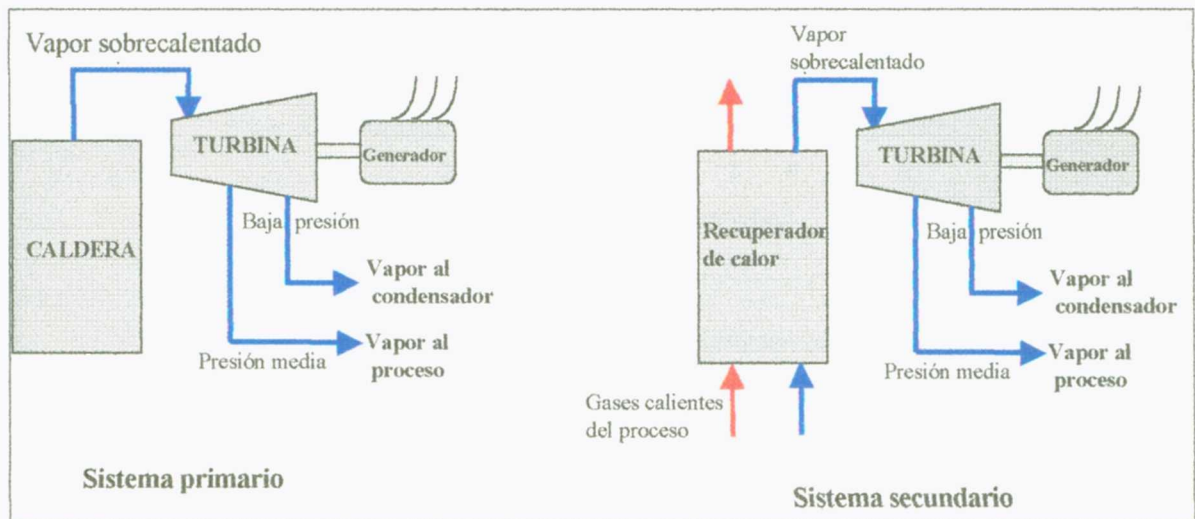


Figura 4.17 Configuraciones básicas de los sistemas de cogeneración.

La cogeneración no afecta la eficiencia de conversión a energía eléctrica ni aumentándola ni disminuyéndola, sino que su ventaja es, como ya se mencionó antes, la disminución en el consumo de combustible para una carga térmica y eléctrica determinada. La eficiencia de estos sistemas se mide en función de la cantidad de energía que se aprovecha, y se le denomina efectividad (ϵ). Consiste en la relación que resulta de sumar la energía eléctrica suministrada más la energía térmica aprovechada dividido entre el calor suministrado por el combustible.

$$\varepsilon = \frac{\text{Energía eléctrica generada} + \text{Energía térmica aprovechada}}{\text{Calor suministrado}}$$

Los valores estimados de efectividad obtenidos mediante cogeneración son del 55 al 70%.¹⁰² Aunque algunos autores reportan valores más altos, tal y como se muestra en la figura 4.18 donde se compara gráficamente la efectividad de sistemas de cogeneración de turbina de vapor y con turbina de gas.

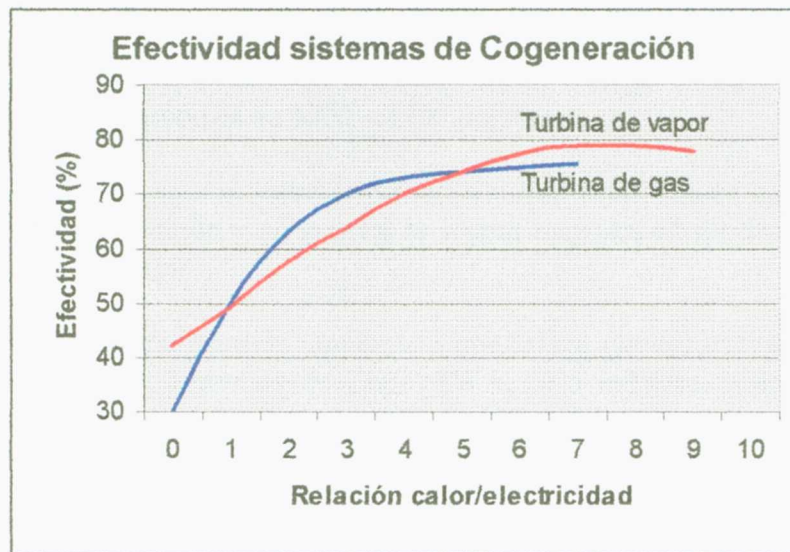


Figura 4.18 Efectividad en sistemas de cogeneración con turbina de vapor y con turbina de gas.¹⁰³

Entre los beneficios que se obtienen al implementar estos sistemas se encuentran los siguientes:

- Menor consumo de combustible para una carga térmica y eléctrica determinadas.
- Disminución en las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.
- Autonomía y seguridad frente a las fallas eléctricas de la red.
- Reducción en la facturación energética.
- La energía eléctrica sobrante puede ser vendida por la empresa.

El ahorro de energía es máximo cuando la relación entre el calor y la energía eléctrica que demanda el usuario del sistema de energía total corresponden a los propios del sistema.

¹⁰² Wark, Keneth, op. cit. Pag. 783

¹⁰³ Buendía Domínguez, Eduardo H. et al. La cogeneración en las plantas industriales

Cuando se produce un desequilibrio en la demanda de uno de los tipos de energía, el sistema seguirá manteniéndose en su punto óptimo siempre y cuando se disponga de un receptor que consuma el sobrante, puede ser otro proceso interno, un consumidor externo o la red eléctrica.¹⁰⁴

4.7 ¿Gas natural o carbón?

Se ha demostrado que los costos de instalación de plantas de generación de energía eléctrica a partir de gas natural son más bajos que en instalaciones alimentadas con carbón. El costo de la planta de gas por kilowatt instalado está en el rango de los 400 – 800 dólares, mientras que para la de carbón es de 1000 – 1700 dólares.

Otras ventajas del gas natural sobre el carbón son que emite menos contaminantes a la atmósfera por kW.h producido y en general se logran mayores eficiencias térmicas de los ciclos productores de energía.

Por ejemplo, una central de ciclo combinado que utiliza gas natural, tiene un costo de 520 dólares/kW, emite 100 gramos de CO₂ / kW.h, 57.6 miligramos de NO_x / kW.h y prácticamente no emite nada de SO₂ ya que el gas natural no contiene azufre o trazas de este. La eficiencia térmica típica es del 42%.

En cambio la planta de ciclo combinado con carbón como combustible cuesta cerca de 1,700 dólares/kW instalado, emisiones de 200 gramos de CO₂ / kW.h, 90 miligramos de NO_x / kW-h y también emite SO₂ en cantidades que dependerán del sistema con el que se disponga para su eliminación¹⁰⁵.

¹⁰⁴ Buendía Domínguez, Eduardo, op. cit.

¹⁰⁵ Fulkerson, William et. al. Energy from Fossil Fuels. Scientific American. Pag. 87

5. CONVERSIÓN DIRECTA DE LA ENERGÍA

5.1 Celdas de combustión

El funcionamiento de las celdas de combustión se conoce desde 1839 cuando Sir William Groves estableció los principios de funcionamiento, posteriormente se utilizaron en los primeros programas de exploración espacial y actualmente se realizan serios esfuerzos de investigación para aplicaciones comerciales en la generación de energía eléctrica y para medios de transporte.

Las celdas de combustión son los dispositivos más prometedores en la obtención de energía eléctrica a partir de los combustibles, ya que éstas no están sujetas a las restricciones que impone el ciclo de Carnot a las máquinas térmicas en la conversión del calor desprendido de las reacciones de combustión en trabajo o potencia y que posteriormente se transforma en energía eléctrica con un generador.

Esto se debe a que las celdas de combustión no son máquinas térmicas, son dispositivos electroquímicos. Las reacciones que se llevan a cabo son del tipo electrolítico, es decir, convierten la energía química contenida en los combustibles directamente en electricidad y calor sin reacciones de combustión intermedias. Su funcionamiento es similar al de las pilas eléctricas, ambas producen corriente directa proveniente de un proceso electroquímico.

Tienen una gran ventaja sobre las baterías, y es que el tiempo que duran funcionando no depende de la cantidad de sustancias químicas que tienen almacenada como sucede en las baterías, las celdas de combustión funcionan mientras se les suministre combustible, el cual obviamente se almacena fuera de la celda de combustión.

Las celdas de combustión trabajan con una amplia gama de combustibles tales como: hidrógeno, gas natural, gas de carbón, gas de relleno sanitario, alcoholes, etc. Por otra parte, debido a que el azufre de los combustibles se elimina antes de ser alimentado a la celda, a las bajas temperaturas a las que operan y a que las reacciones electroquímicas se llevan a cabo sin la presencia de nitrógeno (no pasa a través de los electrodos), prácticamente no emiten compuestos de nitrógeno, NO_x ni de azufre, SO_x como sucede en las centrales termoeléctricas¹⁰⁶.

¹⁰⁶ Research in Progress, Advanced Power Systems, Web

5.1.1 Funcionamiento de las celdas de combustión

Para que la celda funcione se requieren dos reactantes, hidrógeno y oxígeno, dos electrodos, ánodo y cátodo, un circuito externo que transporte los electrones y el electrolito a través del cual se mueven los iones. En la figura 5.1 se muestra un esquema sencillo del funcionamiento de estos dispositivos.

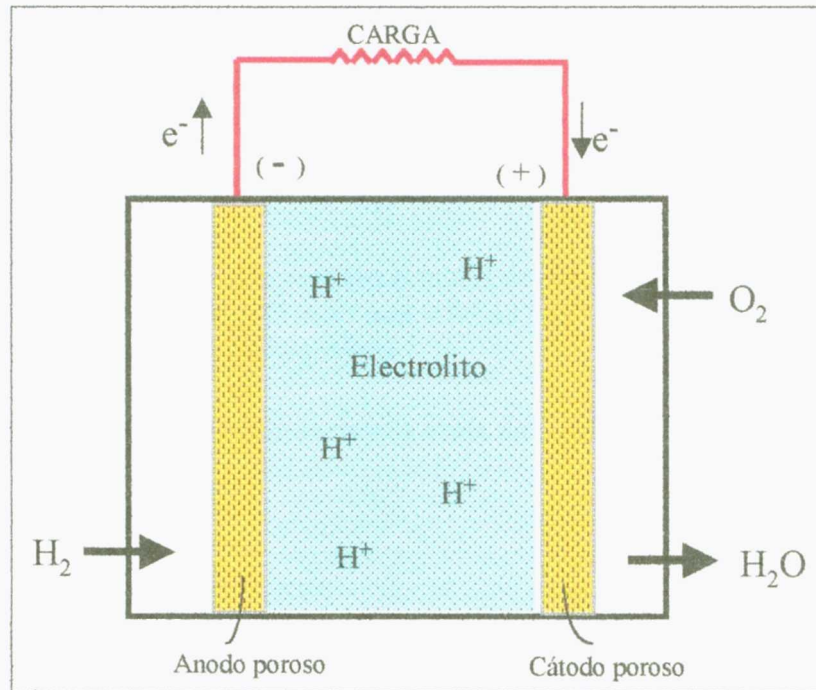


Figura 5.1 Funcionamiento de una celda de combustión.

Los electrodos utilizados en las celdas de combustión son del tipo poroso de difusión gaseosa. De esta forma se puede establecer un buen contacto entre las fases que participan en la reacción, ya que es necesario que exista un buen contacto entre el electrolito, el gas y el electrodo.¹⁰⁷

Para obtener el hidrógeno, el combustible se somete a un proceso de reformado, que consiste en poner en contacto el combustible con vapor de agua a altas temperaturas, lográndose obtener hidrógeno y otros productos como CO y CO₂, entonces se alimentan a la celda de combustión donde se lleva a cabo la oxidación electroquímica.

La energía que producen las celdas proviene de la energía química almacenada en los combustibles y bajo condiciones ideales, el máximo trabajo eléctrico que puede proporcionar

¹⁰⁷ Wedlich, Erhard Constitución y funcionamiento de las pilas de combustible, pág. 13

cuando la reacción se lleva cabo isotérmicamente corresponde al cambio en la energía libre de Gibbs.

$$W_{\text{eléctrico}} = \Delta G_R = \Delta H_R - T\Delta S_R$$

Donde ΔG_R es el cambio en la energía libre de Gibbs

ΔH_R es el cambio de entalpía de la reacción

ΔS_R es el cambio de entropía de la reacción.

También se puede relacionar el cambio de energía libre de Gibbs con la fuerza electromotriz o tensión que produce, partiendo de las relaciones galvánicas:

$$\Delta G_R = -n\mathfrak{F}V$$

n = número de equivalente electroquímicos o moles de electrones producidos.

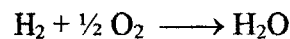
\mathfrak{F} = Constante de Faraday = 96,487 A.s / mol = 96,487 Kj / kgmol.Volt

V = Tensión de salida o fuerza electromotriz.

De esta manera, la tensión de salida de una celda de combustión es igual a:

$$V = \frac{-\Delta G_R}{96,487n}$$

Si tomamos como ejemplo una celda que trabaja con hidrógeno isotérmicamente a 25 °C y se forma agua líquida:



$$\Delta G_R = -237,180 \text{ kJ / kgmol}$$

$$n = 2$$

$$V = \frac{-(-237,180)}{96,487(2)} = 1.229 \text{ Volts}$$

Cuando se requieren tensiones mayores, la celda de combustión se construye en módulos, que se conectan en serie y también configuraciones serie – paralelo para lograr altas densidades de energía. Los esquemas de estos arreglos se pueden ver en la figura 5.2.

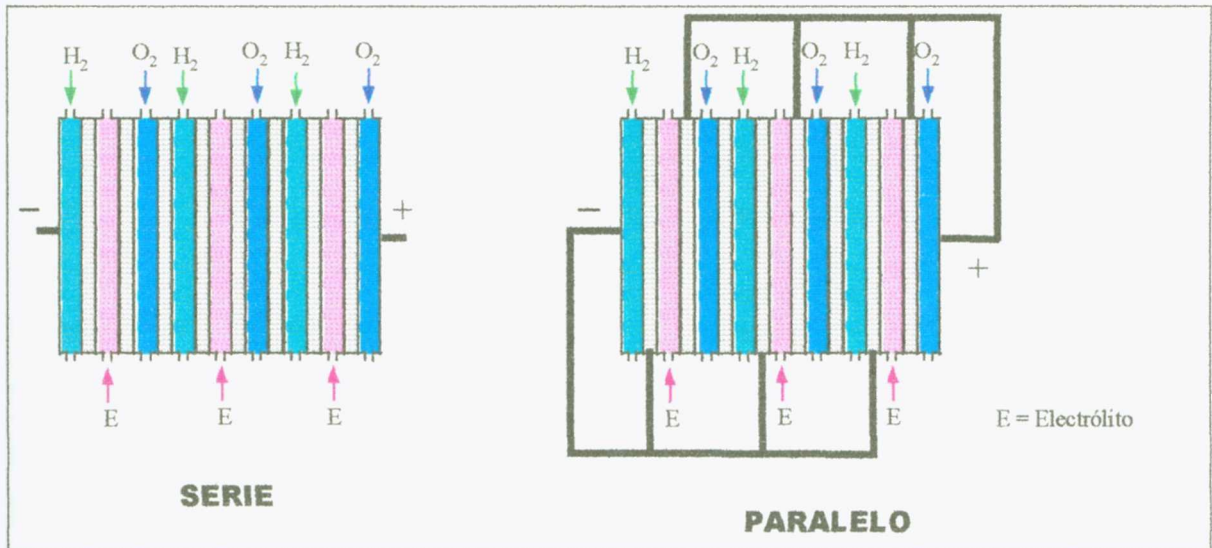


Figura 5.2 Módulos de celdas de combustión conectadas en serie y en paralelo. La conexión en serie proporciona una mayor tensión y la conexión en paralelo permite obtener mayores densidades de corriente.

En el caso de las celdas que funcionan con hidrógeno, conviene operarlas a bajas temperaturas para obtener una tensión elevada. Pero si se quiere obtener densidades de corriente elevadas, entonces es mejor que trabajen a altas temperaturas ya que estas favorecen la velocidad de las reacciones que se llevan a cabo en los electrodos.

También conviene operarlas a altas temperatura, ya que así mejoran su eficiencia y como ya se mencionó antes, las altas temperaturas favorecen la velocidad de las reacciones químicas. Se deberá tener cuidado de no elevar demasiado las temperaturas para evitar reacciones laterales de descomposición del CO₂ en CO y en caso de utilizar aire evitar que en el proceso de reformado el nitrógeno reaccione con el oxígeno y produzca NO_x.

5.1.2 Tipos de celdas de combustión

Los diferentes tipos de celdas de combustión se distinguen por el electrolito utilizado. También se encuentran en un estado de desarrollo diferente. Cada tipo de celda resuelve algunos problemas, pero trae consigo otras dificultades. Los tipos de celdas de combustión son los siguientes:

Celdas de ácido fosfórico (PAFC, phosphoric acid fuel cell).

Celdas de carbonato fundido (MCFC, molten carbonate fuel cell).

Celdas de óxido sólido (SOFC, solid oxide fuel cell).

Celdas alcalinas (AFC, alkaline fuel cell).

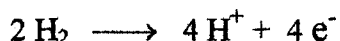
Celdas de polímero sólido (PEM, proton exchange membrane).

Las principales características de estas celdas se presentan en la tabla 5.1.

Tipo	Electrolito	Temperatura de operación (°C)	Características	Aplicaciones
Alcalina (AFC)	KOH (OH ⁻)	50 – 120	Muy eficiente. Sensible al CO ₂ .	Vehículos espaciales. Defensa. Muy costosa.
Polímero sólido PEM	Polímero (H ⁺)	20 – 120	Alta densidad de energía. Flexible	Vehículos espaciales. Carros. Sistemas estacionarios.
Acido fosfórico PAFC	Acido fosfórico (H ⁺)	160 – 220	Eficiencia limitada. Corrosión.	Carros y vehículos grandes. Sistemas estacionarios.
Carbonato fundido (MCFC)	Carbonato fundido (CO ₃ ²⁻)	550 – 650	Difícil de controlar. Corrosión.	Sistemas estacionarios. Calor.
Oxido sólido (SOFC)	Sólido dopado Zr-óxido (O ²⁻)	500 – 1000 °C	Alta eficiencia	Sistemas estacionarios. Calor

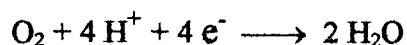
Tabla 5.1 Tipos de celdas de combustión.

Tanto en las celdas PAFC y las de polímero sólido (PEM), el electrolito contiene iones H⁺ en movimiento. Las PAFCs son el tipo de celdas de combustión más desarrolladas para aplicaciones en el transporte.¹⁰⁸ En el ánodo, el hidrógeno gaseoso se ioniza, produciendo iones H⁺ y electrones libres de acuerdo a la siguiente reacción:



Los electrones viajan por un circuito externo y regresan a la celda por el cátodo. Mientras que los iones H⁺ se mueven a través del electrolito hasta llegar al cátodo.

En el cátodo, los iones H⁺ y los electrones reaccionan con el oxígeno produciendo agua.¹⁰⁹

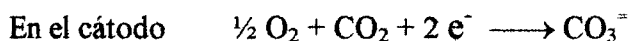
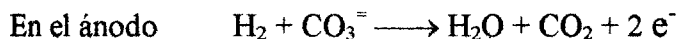


¹⁰⁸ Drenckhahn, Wolfgang et al. Fuel Cells for Mobile and Stationary Applications. Siemens Review

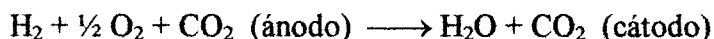
¹⁰⁹ Solid polymer and acid electrolyte fuel cell operation, Web

Las celdas MCFC utilizan carbonatos de litio y potasio como electrolito y trabajan a altas temperaturas de operación altas que son necesarias para alcanzar la conductividad requerida del electrolito. Un efecto asociado con las altas temperaturas de operación es que los procesos de oxidación y reducción electroquímicos no requieren ser catalizados por metales nobles. Actualmente se encuentran en desarrollo este tipo de celdas de combustión para trabajar con gas natural y carbón para los sectores eléctrico e industrial.

Las reacciones que se llevan a cabo en las MCFCs son:



La reacción global se puede escribir como:



El CO_2 que se produce en el cátodo se recicla hacia el ánodo donde se consume. Si se requiere CO_2 adicional, se suministra de una fuente externa o se aprovechan los gases de descarga del ánodo quemándolos y mezclándolos con el CO_2 proveniente del cátodo.

El CO no participa directamente en las reacciones electroquímicas, pero produce H_2 adicional al combinarse con agua.

Las altas temperaturas de operación de las MCFCs le permiten alcanzar mayores eficiencias que las PAFCs y mayor flexibilidad en el uso de diferentes combustibles. Por otra parte, debido a las altas temperaturas se incrementan los problemas de corrosión y vida de las celdas, ya que el electrolito de carbonato fundido es muy agresivo.

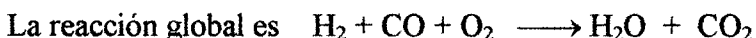
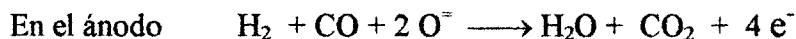
Las celdas de óxido sólido (SOFCs) utilizan un electrolito cerámico de ytrio estabilizado con circonia, trabajando a alrededor de 1000°C . Sus principales ventajas son la naturaleza sólida del electrolito, su capacidad de reformado interno del combustible y su alta temperatura de operación que puede proveer calor de alta calidad para otros usos. El electrolito sólido elimina problemas con el contenedor de electrolito y permite aprovecharlo como parte estructural de la misma celda.

Hay varios aspectos por los cuales la tecnología de SOFC es muy atractiva: son altamente tolerantes a los contaminantes de los combustibles; no presenta problemas de corrosión; debido a las altas temperaturas de reacción no se requieren metales nobles para catalizar y se puede llevar a cabo el reformado del combustible dentro de la celda; el electrolito de óxido sólido es muy estable; el calor de desecho puede aprovecharse para cogeneración. Sin embargo, las altas temperaturas de operación exigen mayores requerimientos en sus

materiales. Los mayores retos que presentan estas celdas son el desarrollo de materiales adecuados y de las cerámicas¹¹⁰.

En las SOFCs los iones de oxígeno (O^{2-}) provenientes del cátodo se transportan por el electrolito sólido hasta llegar al ánodo, Ahí reaccionan con el monóxido de carbono y el hidrógeno provenientes del combustible, liberando los electrones que producen la corriente eléctrica.¹¹¹

Las reacciones químicas que se presentan son:

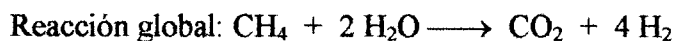
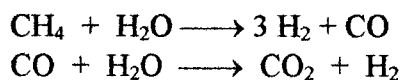


5.1.3 Reformado del combustible

El proceso al que se sujeta el combustible para obtener el hidrógeno depende tanto del tipo de combustible a utilizar como el tipo de celda de combustión que va a operar. Por ejemplo, un combustible que se va a utilizar en una PAFC tendrá que ser rico en hidrógeno y tener menos del 5% de CO, mientras que celdas del tipo SOFC y MCFC por las temperaturas a las que trabajan, son capaces de realizar el reformado del combustible internamente y de aprovechar el CO mediante la reacción de gas de agua que ocurre dentro de la misma celda.¹¹²

Los reactores de reformado con vapor producen hidrógeno en mayor porcentaje que cualquier otro tipo de reformador conocido.¹¹³

Como ejemplo, el proceso de reformado para el metano se representa por la reacción:



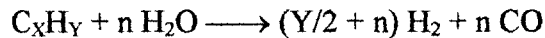
¹¹⁰ Fuel Cells, Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs), **Web**

¹¹¹ Solid Oxide Electrolyte Fuel Cells, SCIENTIFIC AMERICAN, **Web**

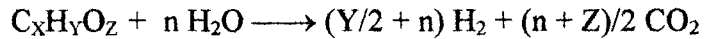
¹¹² Fuel Cell Systems, **Web**

¹¹³ Research in Progress, Advanced Power Systems, Fuel Cell Systems, **Web**

En general para cualquier hidrocarburo, la reacción de reformado se puede escribir como:



Para un alcohol:



5.1.4 Eficiencia de las celdas de combustión

Para el cálculo de la eficiencia de las celdas de combustible se utiliza el criterio aplicado a las máquinas térmicas con el fin de comparar unas y otras, es decir:

$$\eta = \frac{W_{Salida}}{Q_{suministrado}}$$

El trabajo de salida producido por la celda corresponde al trabajo eléctrico y el calor suministrado se toma igual al que se suministraría a una máquina térmica utilizando el mismo combustible, esto corresponde al calor producido por el combustible al quemarlo en un proceso de flujo estacionario, es decir, al cambio en la entalpía de reacción:

$$\eta = \frac{W_{Eléctrico}}{Q_{suministrado}} = \frac{\Delta G_R}{\Delta H_R} = \frac{\Delta H_R - T\Delta S_R}{\Delta H_R} = 1 - \frac{T\Delta S_R}{\Delta H_R}$$

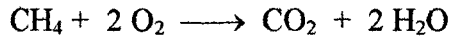
Esta ecuación aplica siempre y cuando el combustible, el oxidante y los productos se encuentren a la misma temperatura; además implica que el combustible se oxida directamente en la celda de combustión sin antes haber pasado por el proceso de reformado, convirtiendo directamente su energía química en energía eléctrica.

De acuerdo a la ecuación anterior, para diferentes combustibles, que entran a 25 °C a la celda de combustión y los productos la abandonan también a 25 °C, la eficiencia térmica teórica se puede calcular utilizando el calor de reacción estándar y la energía libre de formación de Gibbs:

$$\eta = \frac{\Delta G_R^\circ}{\Delta H_R^\circ}$$

Como ejemplo se toma el caso del metano a temperatura constante de 25 °C y considerando que el agua en los productos se encuentra en estado líquido.

Reacción estequiométrica:



Los valores obtenidos de tablas de propiedades termodinámicas para el metano son:

	CH ₄	O ₂	CO ₂	H ₂ O (l)	H ₂ O (g)
Calor de formación estándar, Δh_f° (kJ/kgmol)	-74856	0	-393438	-285771	-241780
Energía libre de formación estándar, Δg_f° (kJ/kgmol)	-50803	0	-394321	-237132	-228545

$$\Delta G_R^\circ = \sum_{\text{Productos}} n \Delta g_f^\circ - \sum_{\text{Reactantes}} n \Delta g_f^\circ$$

$$\Delta H_R^\circ = \sum_{\text{Productos}} n \Delta h_f^\circ - \sum_{\text{Reactantes}} n \Delta h_f^\circ$$

$$\Delta G_R^\circ = (-394321) + (2)(-237132) - (-50803) = -817782$$

$$\Delta H_R^\circ = (-393438) + (2)(-285771) - (-74856) = -890124$$

$$y \quad \eta = \frac{817782}{890124} = 0.9187$$

Valor muy superior a las eficiencias logradas por las máquinas térmicas. Para que una máquina térmica logre esta eficiencia idealmente, tendría que trabajar a una temperatura de 3940 °C.

Realizando los cálculos pertinentes para diferentes combustibles, se obtienen las eficiencias que se muestran en la tabla 5.2

Combustible	Eficiencia ideal (%)
Etanol	97.5
Metanol	97.1
Propano	95.0
Metano	91.9
Etano	94.1
Monóxido de carbono	90.9
Hidrógeno	83.0

Tabla 5.2 Eficiencia isotérmica de diferentes combustibles en una celda de combustión.

Realizando cálculos similares a diferentes temperaturas de funcionamiento de la celda de combustión, se obtiene en forma gráfica los siguientes resultados.

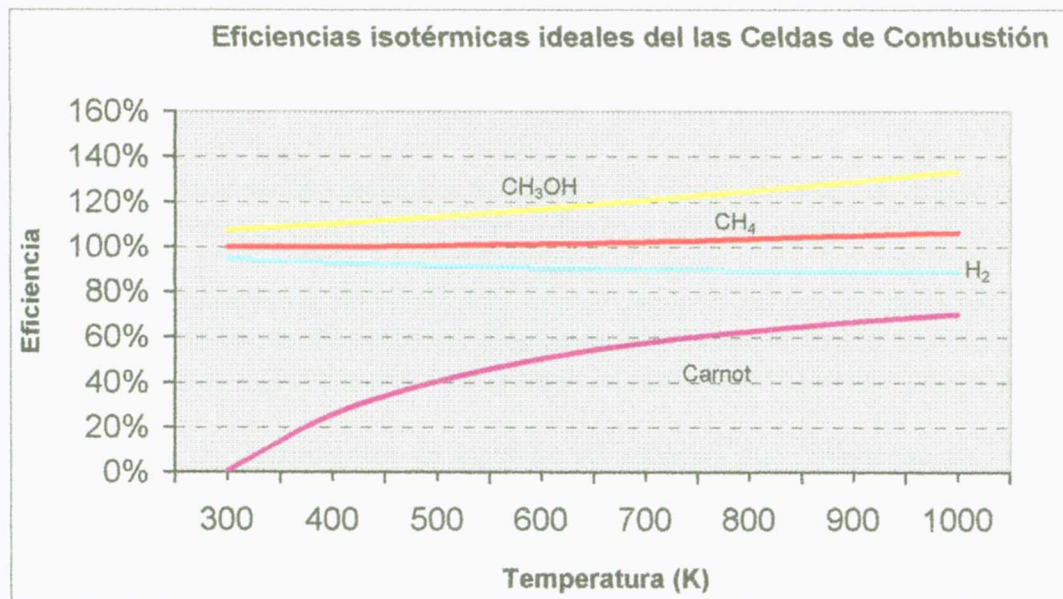


Figura 5.3 Eficiencias isotérmicas ideales de las celdas de combustión y de una máquina térmica de Carnot.

Los resultados de la figura 5.3 se obtuvieron considerando que el agua en los productos se encuentra en estado gaseoso y se compara con el calor estándar de reacción, es decir:

$$\eta = \frac{\Delta G_R}{\Delta H_R^\circ}$$

La explicación de haber obtenido valores de eficiencias mayores al 100% se debe a que para lograr que la reacción se lleve a cabo isotérmicamente, es necesario añadir calor de una fuente externa que también se convierte a energía eléctrica. Así la energía eléctrica obtenida de la celda de combustión es la proveniente de la energía química del combustible mas la energía del calor suministrado. El calor requerido de la fuente externa está dado por el término:

$$Q_{Externo} = T\Delta S_R$$

Si el cambio de entropía de la reacción es positivo, entonces será necesario añadir calor y por el contrario, si es negativo, entonces habrá que enfriar la celda retirando calor por la cantidad $T\Delta S_R$.

5.1.5 Pérdidas de eficiencia en las celdas de combustión

Las celdas de combustión presentan pérdidas en su eficiencia debido a tres factores principales (fig. 5.4):

- 1.- Sobrepotencial en las reacciones anódicas y catódicas, es decir, el voltaje requerido para sobrepasar la energía requerida para que se lleven a cabo las reacciones en los electrodos.
- 2.- La resistencia interna del electrolito, la cual depende del tipo de electrolito y el espesor de la capa que lo forma. Por esto se recomienda utilizar un electrolito con una conductividad específica elevada y que el espesor de la capa del electrolito sea lo más pequeña posible.
- 3.- Problemas de transferencia de masa de las especies que reaccionan en los electrodos. Esto sucede cuando la demanda de corriente aumenta provocando una disminución en la concentración de iones próximos a los electrodos. La velocidad de difusión de estos en el electrolito llega ser menor que la velocidad con que se consumen en la vecindad de los electrodos.

Para evitar en lo posible pérdidas de eficiencia en las celdas de combustión será necesario entonces no sobrecargarlas y si se requieren altas densidades de corriente lo que conviene es conectar varias celdas en paralelo. Además, con el fin de disminuir la resistencia interna, hay que considerar en su diseño dejar el menor espesor posible de electrolito.

También el proceso de reformado afectará negativamente la eficiencia, ya que el proceso requiere de calentamiento externo debido a que las reacciones del combustible con vapor de agua son endotérmicas y el calor que se le suministre es energía que no se convertirá directamente en energía eléctrica.

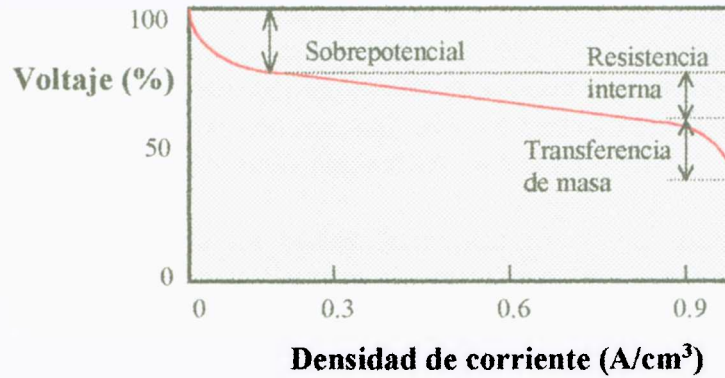


Figura 5.4 Pérdidas de voltaje en una celda de combustión.

En aplicaciones automotrices, las celdas de combustión son muy superiores a los motores de combustión interna tal y como se observa en la figura 5.5 donde se compara el desempeño de las celdas de combustión y los motores de combustión interna.

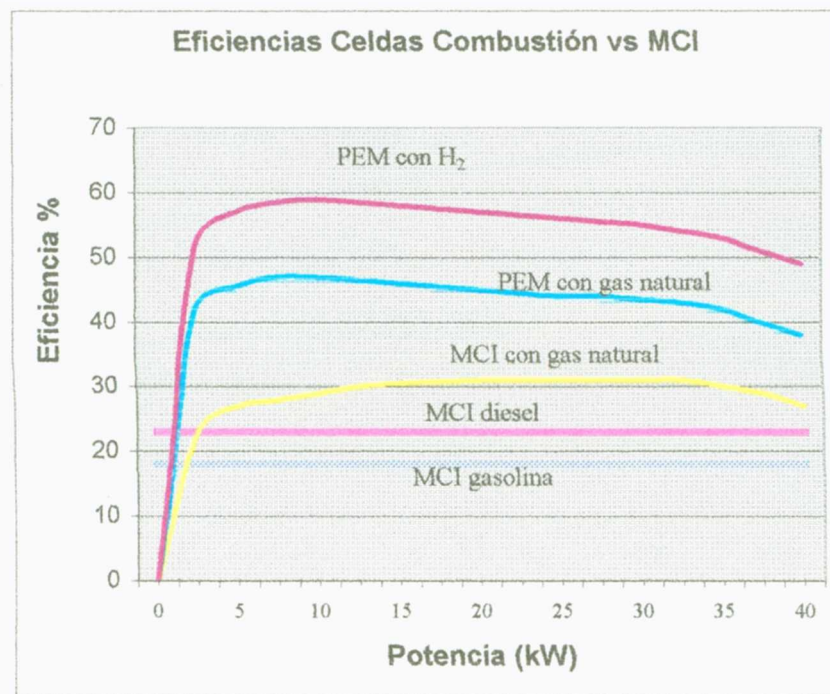


Figura 5.5 Eficiencia celdas de combustión vs MCI en aplicaciones de transporte. MCI es motor de combustión interna. PEM es la celda de combustión de polímero sólido, que es la más apta para aplicaciones automotrices.¹¹⁴

¹¹⁴ Drenckhahn, Wolfgang et al. Fuel Cells for Mobile and Stationary Applications. Siemens Review, pag. 21

En aplicaciones de generación de energía eléctrica, también las celdas de combustión muestran grandes ventajas en cuanto a eficiencia térmica. En la figura 5.6 se comparan eficiencias de diferentes tecnologías. Las eficiencias de las celdas de óxido sólido reportadas son proyecciones hechas de acuerdo con los resultados obtenidos en laboratorio, ya que aún no se comercializan y se espera que estén disponibles para el año 2010.

Es notoria la superioridad de las celdas de combustión tanto sobre los motores de combustión interna, en el caso de aplicaciones automotrices, así como sobre los sistemas convencionales de generación de energía eléctrica. Por este motivo es recomendable dar un fuerte impulso a la investigación y desarrollo de esta tecnología. Además de ser dispositivos muy eficientes en la conversión de energía de los combustibles derivados del petróleo o del carbón, también utilizan eficientemente combustibles renovables como son los alcoholes y gases de rellenos sanitarios.

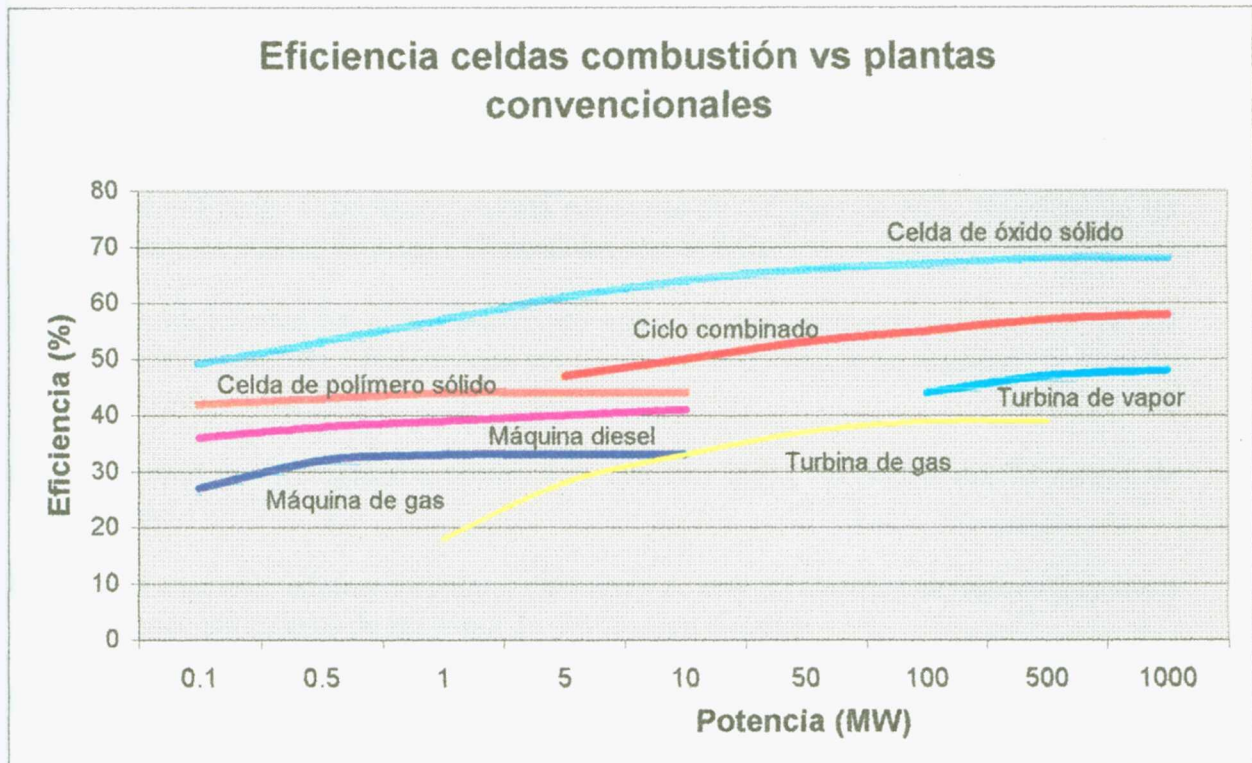


Figura 5.6 Eficiencias térmicas de celdas de combustión y sistemas convencionales de generación de energía eléctrica.¹¹⁵

5.1.6 Ventajas de las celdas de combustión

¹¹⁵ Drenckhahn, Wolfgang et al. op. cit., pag. 22

1. Las eficiencias de conversión de energía de las celdas de combustión son altas, dependiendo del tipo de celda son del rango de 40 al 70%. Su eficiencia se mantiene constante, independientemente del tamaño del equipo y la carga de trabajo. Incluso teóricamente pueden llegar a tener rendimientos mayores al 100%, que en el caso de las máquinas térmicas, ni idealmente llegan al 100% debido a las restricciones que les impone el ciclo de Carnot.
2. Si el calor de desecho, cuando lo haya, se utiliza para otras aplicaciones (cogeneración por ejemplo) se pueden alcanzar eficiencias en el orden del 80 al 90% respecto al aprovechamiento del contenido térmico del combustible.
3. Debido a las altas eficiencias de estos dispositivos, las emisiones de CO₂ son mucho menores para una potencia de salida determinada y en la misma proporción disminuye el consumo de combustible.
4. Las emisiones de NO_x y SO_x son muy bajas, alrededor de 0.2 y 1.4 gramos/MW-h respectivamente¹¹⁶, esto se debe a las bajas temperaturas de operación, a que el combustible debe entrar libre de azufre a la celda y a que dentro de las celdas de combustión las reacciones se llevan a cabo sin la presencia de nitrógeno. La National Renewable Energy Laboratory, reporta emisiones de 0.5 ppm de NO_x obtenidas de las mediciones en plantas de prueba alimentadas con SOFCs.¹¹⁷
5. Son autosuficientes en el suministro de agua, la que requieren la obtienen de los productos de reacción y por las bajas temperaturas de operación no requieren de agua de enfriamiento.
6. Son equipos que trabajan con niveles de ruido muy bajos, 60 decibeles a 30 metros de distancia.
7. Son una excelente alternativa para el suministro de energía eléctrica en lugares aislados o que se encuentren lejos de las líneas de distribución eléctrica.
8. Se pueden configurar para un rango muy amplio de potencia de salida debido a que se puede instalar en módulos. En rangos de 0.025 a 50 MW para celdas alimentadas con gas natural y mayores a 100 MW para celdas que trabajan con gas de carbón (CO + H₂).
9. Son muy flexibles en cuanto a la fuente de combustible, ya que el hidrógeno que se consume directamente en las celdas se puede obtener a partir cualquier combustible, gas natural, alcoholes, gas de relleno sanitario, biogas, etc. No depende exclusivamente de los derivados del petróleo, puede utilizar combustibles renovables.

¹¹⁶ Fuel Cells: Advantages of the Fuel Cell Power Plant, **Web**

¹¹⁷ Solid Oxide Electrolyte Fuel Cells, Scientific American Explorations.

10. Son muy confiables, requieren muy poco mantenimiento. Las pruebas piloto han reportado períodos continuos de operación sin necesidad de darles mantenimiento. Por ejemplo, se reportan 9,000 horas de funcionamiento continuo de un sistema de PAFCs¹¹⁸ sin necesidad de mantenimiento y de unidades con 24,000 horas de operación, que es un poco mayor a la mitad de la meta económica de 40,000 horas de operación.¹¹⁹
11. Su instalación se puede realizar en un amplio rango de climas y zonas geográficas.
12. En aplicaciones automotrices, la Chrysler reporta que el hidrógeno para alimentar la celda de combustión se puede obtener de la gasolina de bajo octanaje reformándola en el mismo automóvil. Con rendimientos de 80 millas por galón de gasolina, más silenciosas y con menos partes móviles que las máquinas convencionales.¹²⁰

Entre las desventajas de las celdas de combustión, de las más importantes son sus altos costos. Las celdas de ácido fosfórico (PAFCs), que son las menos costosas, ya se han comercializado y tienen un costo aproximado de \$ 3,000 dólares / kW¹²¹. Se espera una reducción en sus costos conforme su comercialización vaya en aumento y de su producción en mayores escalas.

Se estima que los costos de instalación lleguen a ser inferiores a los \$1,200 dólares por kilowat de potencia instalada, o incluso a precios menores que las plantas actuales alimentadas por carbón.¹²²

5.2 Celdas fotovoltaicas

Una celda fotovoltaica consiste en obleas de materiales semiconductores con diferentes propiedades electrónicas, cuyo principal material es silicón alterado (dopado) con una pequeña cantidad de boro.

El principio de funcionamiento de las celdas fotovoltaicas se basa en el efecto fotoeléctrico, el cual consiste en la producción de energía eléctrica por la acción de la luz al incidir sobre un determinado material que es capaz de liberar electrones por esta acción. Las características principales del efecto fotoeléctrico son:

¹¹⁸ Fuel Cell Types, Web

¹¹⁹ Phosphoric Acid Fuel Cell Commercialization, Web

¹²⁰ Chrysler develops method for extracting hydrogen from gasoline, Web

¹²¹ Phosphoric Acid Fuel Cell Commercialization, Web

¹²² M-C POWER-Developing the 2nd Generation Fuel Cell, Web

1. El efecto fotoeléctrico es instantáneo, es decir, aparece con la radiación sin retraso sensible.
2. El número de electrones producidos, es decir la intensidad de la corriente, es proporcional a la radiación recibida.
3. La velocidad de la emisión depende de la frecuencia y la longitud de onda de la radiación incidente.
4. Cada metal tiene una frecuencia mínima de la radiación luminosa, por debajo de la cual no se presenta el efecto fotoeléctrico.

La energía de las ondas electromagnéticas (e) es directamente proporcional a su frecuencia (ν). La radiación tendrá mayor energía al aumentar la frecuencia y disminuir su longitud de onda (λ). Esto está dado por la ley de Planck:

$$e = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

h = Constante de Planck = 6.63×10^{-34} J.s

c = Velocidad de la luz

Por lo anterior, las celdas fotovoltaicas trabajan mejor durante las horas de mayor insolación, pero además tienen la capacidad de producir electricidad en casi cualquier condición de iluminación.

No toda la radiación solar que intercepta la tierra llega a su superficie, parte se refleja en la parte superior de las nubes y otra parte es absorbida por las moléculas del aire. La intensidad que llega a la superficie es de unos $1,000 \text{ W/m}^2$.

La luz solar está formada por un gran número de fotones, cuando la luz choca sobre la celda solar, cada uno de los fotones es absorbido liberando electrones del cristal de silicio. Si el fotón tiene suficiente energía, los electrones serán capaces de vencer el campo eléctrico de la unión y moverse a través del silicio y hasta un circuito externo. Cuando fluyen a través del circuito externo, pueden proporcionar energía para hacer un trabajo (cargar baterías, mover motores, encender lámparas, etc.).

El proceso fotovoltaico es completamente de estado sólido contenido en sí mismo. No tiene partes móviles ni materiales consumibles o emisores.

La unidad básica de un sistema fotovoltaico es la celda solar o celda fotovoltaica. Las celdas solares están hechas del material semiconductor sensible a la luz. Un módulo solar se compone de varias celdas solares interconectadas y varios de estos módulos montados en un marco forman el panel solar.

En la fabricación de celdas solares se utilizan diferentes materiales: obleas de silicio puro monocristalino o policristalino; delgadas capas de silicio amorfo o policristalino; celdas de alta eficiencia de aleaciones como el arseniuro de galio.¹²³

Virtualmente cualquier necesidad de energía eléctrica puede satisfacerse mediante un adecuado diseño del sistema de energía fotovoltaica. Esto incluye energía para iluminación, bombeo, radiocomunicación, electrificación doméstica, protección catódica, etc. La única limitación es el costo del equipo y, ocasionalmente, el tamaño del arreglo fotovoltaico, aunque éste raramente es un factor problema.

Para que una célula solar expuesta al sol produzca energía eléctrica debe reunir las siguientes tres características fundamentales:

- a) Ser capaz de absorber una fracción importante de la radiación solar para que la generación de pares electrón-hueco sea eficiente.
- b) Tener un campo eléctrico interno que separe las dos cargas (positivas y negativas) impidiendo su posterior recombinación.
- c) Finalmente, las cargas separadas deben ser capaces de viajar a través de la oblea hasta los electrodos superficiales desde donde pasan al circuito exterior.

Debido a que una célula solar genera corrientes y tensiones pequeñas, éstas no son los elementos que se utilizan en las aplicaciones prácticas, sino que, con objeto de lograr potencias mayores, se acoplan en serie o en paralelo para obtener mayores tensiones y corrientes formando lo que se denomina módulo fotovoltaico, que es el elemento que se comercializa. A la vez, estos módulos se conectan en serie o en paralelo para obtener las tensiones y corrientes que nos den la potencia deseada. Los módulos en serie aumentan el voltaje y conservan la misma corriente, mientras que módulos en paralelo aumentan la corriente, conservando el mismo voltaje.

5.2.1 Costos

El costo inicial de un sistema fotovoltaico es relativamente alto, ronda entre los 10 y 15 dólares por watt, comparado con el costo de una planta de carbón cuyo costo es alrededor de \$1.0 dólares por watt. Usando costos típicos de amortización y vida del equipo el costo del ciclo de vida generado mediante energía fotovoltaica generalmente oscila en rangos de 0.30 a 1.00 dólares / kW·h, en cambio, en una central de carbón los costos de generación son de entre 0.08 y 0.20 dólares por cada kW·h (sin considerar en este último caso los costos ambientales).

¹²³ Solar and Photovoltaic: Technology Characterization, Web

El costo de un sistema fotovoltaico puede llegar a ser menor al de extender una línea hasta el lugar donde se localiza la aplicación. Un kilómetro de línea eléctrica de media tensión tiene un costo entre \$10,000 y \$20,000 dólares, dependiendo de las características del entorno. Por cada kilómetro de línea eléctrica se podría pagar el costo de un sistema fotovoltaico con capacidad de 3 kW·h/día (una vivienda pequeña consume alrededor de 0.5 kW·h/día).¹²⁴

Para cargas menores a 10 kW h/día el costo de operación de un sistema fotovoltaico es menor al de un sistema diesel, tal y como se puede observar en la figura 5.7

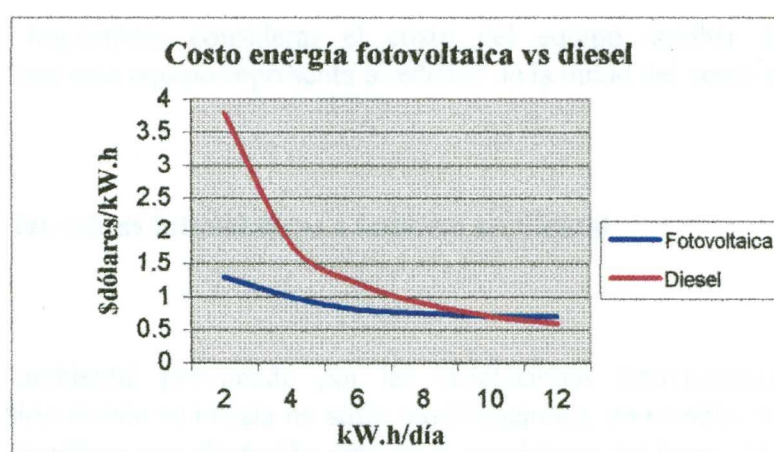


Figura 5.7 Comparativo de costos de energía fotovoltaica y de una planta de diesel. Para cargas menores a 10 kW.h/día las instalaciones fotovoltaicas son más económicas.¹²⁵

A pesar de que hoy en día el costo de la energía proveniente de las celdas fotovoltaicas es alrededor de 5 veces más alto que los sistemas convencionales, estos han ido cayendo rápidamente en los últimos años y el mercado de las celdas fotovoltaicas está creciendo en un 20% anual,¹²⁶ por lo que se espera que en un futuro no muy lejano sea competitivo con los sistemas tradicionales de producción de energía. En la figura 5.8 se puede observar la variación de estos costos.

¹²⁴ Berrueta Soriano, Víctor M., Instalaciones Solares Fotovoltaicas, pag. 10 - 12

¹²⁵ CONDUMEX, Los Sistemas Solares Fotovoltaicos, pág. 4

¹²⁶ Renewable Energy: Photovoltaics, Web

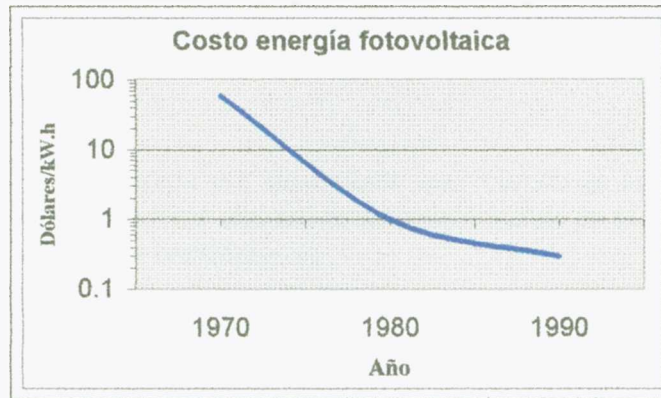


Figura 5.8 Disminución del costo de la energía fotovoltaica en los últimos años.

También es importante considerar el costo del equipo auxiliar de la instalación fotovoltaica, ya que este equipo representa alrededor de la mitad del costo total.¹²⁷

5.2.3 El uso de las celdas fotovoltaicas e impacto ambiental

El impacto ambiental provocado por las instalaciones fotovoltaicas es mínimo, el ecosistema del sitio donde se instala no sufre modificaciones, en cambio, extender una línea eléctrica puede significar una alteración seria en el ecosistema del lugar (derribo de árboles, corte de terreno, etc.) y operar una planta que consume combustibles implica contaminación del aire, del suelo, ruido, etc.

Es silencioso, no produce contaminación ni requiere combustible, su fuente de energía es la luz del Sol. Algunos materiales peligrosos tales como metales pesados (plomo, níquel) ácidos y bases, son usados en la fabricación de celdas solares, por lo que deberá cuidarse de que no sean enviadas al medio ambiente, sino de proveer de las instalaciones necesarias ya sea para reusarlas, reciclarlas o darles un tratamiento adecuado.

5.2.4 Especificaciones

La mayoría de los sistemas fotovoltaicos están diseñados para abastecer energía cuando se necesita, y se incluyen baterías para almacenar la energía generada por el arreglo de

¹²⁷ Weinberg, Carl J. et al. Energy from the Sun, Scientific American, pag 102

módulos fotovoltaicos y utilizarla posteriormente. Los sistemas con baterías requieren de aparatos electrónicos que controlen el cargado o limiten la descarga de las baterías (controladores de carga).

La corriente eléctrica generada por un sistema fotovoltaico es corriente directa, por lo que en caso de requerir de corriente alterna, es necesario incluir en el sistema un convertidor de corriente directa a corriente continua.

Para suministrar la energía que se consume en promedio en una casa de los Estados Unidos mediante un sistema fotovoltaico cuya eficiencia es del 12%, se requiere cubrir un área de 40 metros cuadrados y orientando los paneles hacia el sur.¹²⁸

5.2.5 Eficiencia

El rendimiento o eficiencia de una celda fotovoltaica se puede definir como el cociente entre la potencia eléctrica que suministra y la potencia luminosa que incide sobre su superficie.

La moderna celda solar tiene alrededor del 13% de eficiencia. Esto es un poco más de la mitad del máximo teórico de eficiencia para estos aparatos. En laboratorio se ha logrado fabricar celdas de silicio con eficiencia cerca al 30% y del 35% para celdas de arseniuro de galio. El reto es aumentar la eficiencia y a la vez reducir el costo.

En vista que el “combustible” es gratis (el sol) la eficiencia no es problema limitante en los sistemas FV. El costo es, en la mayor parte de los casos, el factor limitante hoy en día.

Las causas por las cuales el rendimiento de las celdas fotovoltaicas es bajo son:

- No todos los fotones de la luz incidente disponen de la energía suficiente para romper los enlaces covalentes del silicio y liberar los electrones.
- Los fotones cuya energía es mayor a 1.11 eV se disipa en forma de calor. El 43% de la energía de los fotones que chocan con la superficie de la celda se convierte en calor.
- Algunos electrones liberados por los fotones se pierden al ocupar huecos dejados por otros electrones (recombinación).
- Parte de la luz incidente se refleja en la superficie de la celda.
- Los contactos, instalados en forma de rejilla para poder canalizar los electrones liberados hacia el circuito externo, no son transparentes y en consecuencia no toda la superficie de la celda recibe luz.

¹²⁸ Weinberg, Carl J, et al. Energy from the Sun, Scientific American, pag 101

- Pérdidas por el efecto Joule debidas a la resistencia del silicio al paso de la corriente.

Además la eficiencia es fuertemente dependiente de la temperatura. Conforme la temperatura aumenta, la resistencia interna del material de la celda aumenta y por tanto su conductividad eléctrica disminuye.¹²⁹

- A 0°C las celdas de silicio tienen una eficiencia del 24%.
- A temperatura ambiente su eficiencia es del 12%.

Los módulos de máxima calidad tienen una vida útil promedio de al menos 30 años. Están diseñados para soportar los rigores del medio ambiente, incluyendo los fríos árticos, calores del desierto, humedades tropicales, vientos huracanados de más de 200 km/hr y granizo de una pulgada.

5.2.6 Sistema híbrido

La combinación de un sistema de energía solar con un generador (un sistema híbrido) podría ser una alternativa económica en vez de invertir en un sistema solar de gran autonomía. Así, el sistema de energía solar no tiene por que ser tan grande para que cubra la necesidad de potencia durante las horas picos y/o una gran autonomía para días con mal tiempo. Un generador de gasolina, propano o diesel, en combinación con un cargador de baterías puede proveer potencia cuando los módulos fotovoltaicos no operan de manera óptima o las baterías tienen un nivel de baja carga.

5.2.7 Ventajas y desventajas

Ventajas:

1. No requiere de combustible, su fuente de energía es la luz solar.
2. No emite gases contaminantes a la atmósfera.
3. Su operación es silenciosa.
4. Los costos de operación son insignificantes.
5. El precio de la energía fotovoltaica no está sujeto a las fluctuaciones del mercado como es el caso de los derivados del petróleo.

¹²⁹ Solar Energy: Conversion into Electricity, Web

6. Es una fuente confiable, la variación anual en la insolación es del 1%.
7. No requiere de grandes cantidades de agua, sólo la necesaria para los acumuladores.
8. Su mantenimiento es casi nulo al no tener partes en movimiento que se desgasten o requieran ajuste y los equipos auxiliares son, en su mayoría, libres de mantenimiento.
9. Larga vida útil, de 20 a 30 años.
10. Al ser modulares se pueden instalar a cualquier escala y la posibilidad de crecimiento es ilimitada.
11. Fáciles de instalar, transportar y ensamblar.
12. Puede formar sistemas híbridos al combinarse con otras formas de generación de energía eléctrica.
13. Se pueden instalar en lugares remotos.
14. No está sujeto a las limitaciones del ciclo de Carnot.

Desventajas:

1. Su fuente de energía, la luz solar, no está disponible las veinticuatro horas del día.
2. Costo inicial relativamente alto.
3. La energía producida no es fácil de almacenar.
4. Produce corriente directa, mientras que la mayoría de los aparatos eléctricos están diseñados para funcionar con corriente alterna.

Actualmente se está trabajando en el desarrollo de celdas fotovoltaicas fabricadas de polímeros semiconductores o metales sintéticos. Su duración es mayor que la de los metales y su costo de fabricación es menor. Además son más fáciles de hacer. Ya se han producido a nivel de laboratorio celdas solares plásticas utilizando dos polímeros, alcohol polivinílico y poliacetileno, que se ha patentado como Lumeloid. Funcionan polarizando la luz y en teoría convierten tres cuartas partes de esta en electricidad. Además promete ser mucho más barata que las celdas solares actuales, se espera que no exceda de 50 centavos de dólar por watt.

El proceso mediante el cual funciona el Lumeloid es similar al de la fotosíntesis. En las hojas de las plantas se encuentran estructuras llamadas diads, que actúan como terminales positivas y negativas que canalizan los electrones energéticos por la luz solar. En forma similar el Lumeloid contiene diads moleculares y unos electrodos extraen la corriente de electrones de la superficie de la película polimérica.¹³⁰

¹³⁰ Leutwyler, Kristin. PLASTIC POWER, Scientific American.

5.3 Energía eólica

La energía eólica o energía del viento es una forma de energía renovable cuya fuente primaria es el Sol. Se deriva del calentamiento diferencial de la atmósfera por el Sol y las irregularidades de la superficie terrestre. Su conversión a energía eléctrica se logra mediante turbinas que son movidas por hélices expuestas al viento.

Aunque solamente una pequeña parte de la energía solar que llega a la tierra se convierte en energía cinética del viento, la cantidad total es enorme. Se estima que alrededor del 2% de la energía solar que llega a la tierra se transforma en energía cinética de los vientos, de la cual un 35% se disipa en una capa de 1 km por encima del nivel del suelo.

En los últimos 20 años se han hecho avances tecnológicos importantes en este campo. Las turbinas de viento modernas son resistentes, durables y muy eficientes en la conversión de la energía natural disponible del viento en energía eléctrica.

Es un recurso variable tanto en su localización como en el tiempo. Debido a las irregularidades del terreno pueden darse grandes variaciones en la velocidad del viento en distancias cortas, por lo que es esencial localizar los mejores sitios posibles donde se pueda aprovechar el recurso con relativamente alta densidad energética. En un lugar determinado, la energía del viento es prácticamente constante a escala anual, pero presenta importantes irregularidades a escalas de tiempo menores, meses (variaciones estacionales), horas (ciclos diarios) y minutos (rachas). La distribución de vientos se puede conocer por medio del anemómetro.

La velocidad promedio del viento y su distribución en un sitio determinado son factores a considerar para su implantación. Una vez determinadas las regiones más favorables para la instalación de sistemas de potencia eólicos, se eligen cerros o colinas que dominan terrenos despejados ya que la velocidad del viento aumenta con la altura y se procura evitar las turbulencias provocadas por obstáculos (árboles, edificios, etc.). Arriba de los 15 metros sobre el nivel del suelo se estima que es posible captar alrededor del 70% de los vientos de mayor velocidad¹³¹. Este es el motivo por el cual las máquinas se encuentran colocadas varias decenas de metros por encima del nivel del suelo.

A pesar de que el viento no sopla continuamente, no implica un problema en la alimentación intermitente a la red de distribución ya que el sistema constantemente tiene que estar ajustándose a distintos niveles de suministro y demanda.

En cuanto al uso del terreno o espacio requerido para su instalación, no representa problema, ya que solamente el 5% del terreno disponible para aprovechamiento eólico será

¹³¹ Wind Siting, Web

utilizado para la instalación del equipo y los caminos de acceso necesarios. Por esto, el uso normal que se le da para actividades de agricultura y ganadería no se ve afectado.

5.3.1 La turbina o generador eólico

Las partes que constituyen un generador eólico son las siguientes¹³²:

- Aspas
- Generador de electricidad
- Torre de soporte
- Cables de transmisión
- Cables de tensión

El aire pasa sobre la parte superior del aspa a mayor velocidad que en la parte inferior, provocando un empuje ascendente o tirón hacia arriba (similar al principio de funcionamiento de las alas en los aviones) que la hace girar sobre un eje que conecta a las aspas con el generador. El movimiento rotacional se transfiere directamente hacia el generador y de esta forma se induce una corriente eléctrica la cual es transportada por los cables de transmisión hacia el lugar de consumo o la red de distribución.

La torre de soporte es la estructura donde van montadas las aspas y el generador de electricidad y los cables de tensión sirven de soporte a la torre para evitar que sea derribada por el viento.

Cuando las necesidades de energía son superiores a las que puede aportar una sola turbina eólica, se instalan varias turbinas en el lugar. A estos sistemas se le denomina granja de viento o sistema eólico.

Los componentes de una “granja de viento” (windfarm) cuya producción de energía eléctrica alimenta la red de distribución incluye turbinas de viento, un sistema de transmisión de energía bajo tierra, instalaciones de control y mantenimiento, una subestación que conecta la granja con la red de distribución de energía y caminos de acceso. Estos sistemas se localizan generalmente en áreas en las que la velocidad anual promedio del viento es de por lo menos 21 km/h (13 mph).¹³³

Una de las aplicaciones de la energía eólica son los sistemas de uso distribuido, los cuales proveen energía en el lugar de uso (on-site). Estos sistemas trabajan en rangos de uno a 25

¹³² ENERGIA EOLICA, Web

¹³³ Wind Energy in California, Web

kW y pueden ser una buena opciones para abaratar costos en localidades que por su lejanía a las redes de distribución de energía eléctrica no es económicamente factible su conexión. Estos sistemas son aplicables a la industria, distritos de riego, residencias rurales, uso agrícola y a una amplia variedad de casos aislados de uso de potencia localizados en lugares con buenos vientos.

5.3.2 Principios de operación:

La energía cinética contenida en una corriente de viento y su relación con la potencia de las turbinas de viento fue desarrollada por el científico alemán George Betz en 1972¹³⁴, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\dot{W} = \frac{1}{2} \epsilon \rho A u^2$$

Donde \dot{W} = Potencia de la turbina.

ϵ = Eficiencia de la turbina de viento.

ρ = Densidad del aire.

A = área transversal al flujo del viento de la silueta formada por la hélice de la turbina girando.

u = velocidad del viento.

El significado de estas variables se pueden apreciar en la figura 5.9 donde se esquematiza una turbina eólica expuesta a una corriente de viento.

Esto se puede demostrar sabiendo que la potencia esperada de la turbina de viento es igual a su eficiencia multiplicada por la energía cinética suministrada por el viento a la turbina, siendo esta igual a:

$$Ec_v = \frac{1}{2} \dot{m} u^2$$

\dot{m} = Flujo másico de la corriente de viento que pasa a través de la hélice.

¹³⁴ Wind Siting, Larry Elliott, Web

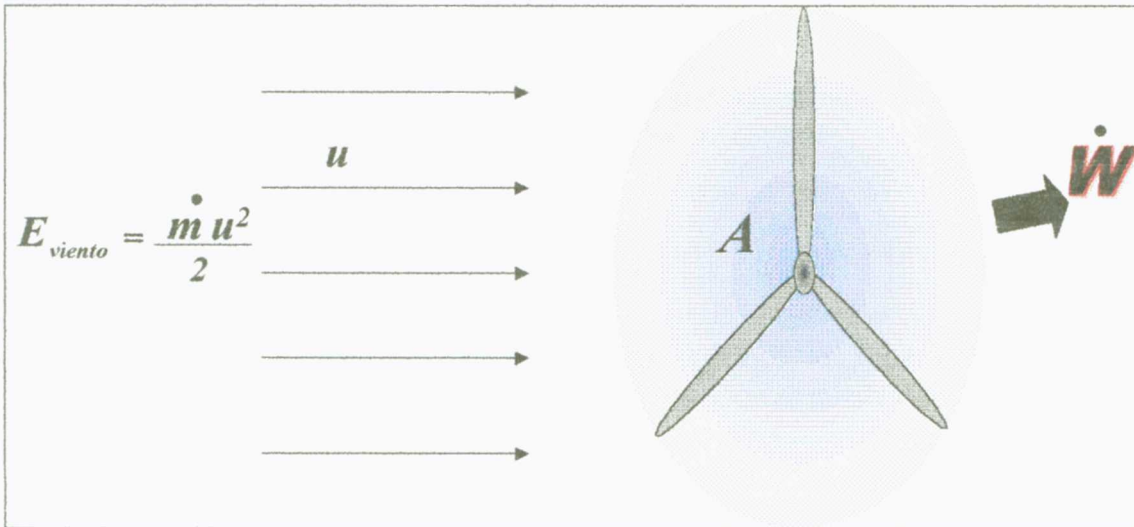


Figura 5.9 Hélice de viento expuesta a una corriente de aire.

De acuerdo con la ecuación de continuidad, el flujo másico puede expresarse como:

$$\dot{m} = \rho A u$$

Como la potencia de la turbina es la energía que recibe del viento multiplicada por la eficiencia de la turbina:

$$\dot{W} = \varepsilon E_{c.} = \frac{1}{2} \varepsilon \dot{m} u^2 = \frac{1}{2} (\rho A u) u^2 = \frac{1}{2} \varepsilon \rho A u^3$$

que es la ecuación de Betz.

Considerando que el aire atmosférico se comporta como gas ideal, su densidad puede calcularse partiendo de la ecuación de estado de los gases ideales:

$$\rho = \frac{MP.}{RuT.}$$

Tomando $Ru = 0.08314 \text{ bar}\cdot\text{m}^3 / \text{Kg mol}\cdot\text{K}$, la masa molecular del aire es de 28.97 y la temperatura se puede expresar como $T. + 273$. Sustituyendo:

$$\rho = \frac{28.97 P.}{0.08314 (T. + 273)} = \frac{348.45 P.}{T. + 273}$$

La temperatura T_o en °C y la Presión P_o en bar.

Sustituyendo estos resultados en la ecuación de la potencia de la turbina y utilizando los correspondientes factores de conversión de unidades, se obtiene:

$$\dot{W} = \frac{0.174 \varepsilon P_o A u^3}{273 + T_o}$$

En una localidad determinada y para un equipo específico, los valores de P_o , T_o y el área A se pueden tomar como constantes, por lo que la ecuación se puede expresar de la forma:

$$\dot{W} = k u^3 \quad \text{donde} \quad k = \frac{0.174 \varepsilon P_o A}{273 + T_o}$$

El resultado anterior indica que la potencia disponible del viento es proporcional al cubo de su velocidad. Las consecuencias de esto son muy importantes, ya que un cambio muy pequeño en la velocidad del viento se refleja en un incremento o decremento en la potencia de la turbina.

Para ilustrar este efecto, supóngase que un equipo produce 100 watts de potencia cuando la velocidad del viento es de 25 km/h. Si la velocidad del viento aumenta al doble, 50 km/h, la potencia no aumenta también el doble, su incremento es mucho mayor:

$$\text{Como } \dot{W} = k u^3, \text{ entonces } \dot{W}_2 = \dot{W}_1 \left(\frac{u_2}{u_1} \right)^3 \quad \text{y}$$

$$\dot{W}_2 = 100 \text{ W} \left(\frac{50}{25} \right)^3 = 800 \text{ W}$$

El aumento de potencia fue de ¡8 veces!, el aumento en la velocidad del viento implicará un incremento del 12.5% en la potencia. Es por este motivo que la velocidad promedio del viento de una determinada localidad es un factor crítico determinante en la factibilidad económica en la instalación de las máquinas eólicas.

Con relación al tamaño de las aspas de la turbina, la potencia es proporcional al cuadrado del diámetro del rotor¹³⁵. En otras palabras, si se incrementa al doble la longitud de las aspas, la potencia no se duplicará, sino que se cuadruplicará. En este punto hay que tener cuidado de no instalar aspas demasiado grandes, ya que esto las hace más débiles estructuralmente y un viento fuerte puede llegar a destruirlas.

¹³⁵ Building Your Own Wind Machine-Sagrillo, Web

De la energía disponible, las máquinas eólicas solamente aprovechan una fracción. Se relaciona mediante el coeficiente de potencia (η_E), el cual se define como el cociente de la potencia recuperada por la máquina (w) entre la potencia del viento (Ec).

$$\eta_E = w / Ec$$

Siendo el coeficiente de potencia de las máquinas actuales alrededor de un 30 a 40%¹³⁶.

Los equipos más comunes trabajan en el rango de 500 a 800 kW. Actualmente se encuentran en desarrollo turbinas de viento de 1 hasta 5 MW.

Una granja de viento de catorce turbinas de 400 kW cada una (5600 MW), puede cubrir las necesidades de 5,000 hogares y eliminar la producción de alrededor de 17,000 toneladas de CO₂ por año¹³⁷.

Desafortunadamente la energía eólica no puede suplir al 100% la generación de energía eléctrica debido a su naturaleza intermitente, por lo que se limita su uso como fuente complementaria o de apoyo a la red de suministro. De hecho, ninguna de las tecnologías de generación de energía es disponible al 100% del tiempo, esto se debe a diversos motivos como las rutinas de mantenimiento y otras razones.

La productividad de una planta generadora de electricidad se relaciona mediante el concepto de factor de carga, que es la relación expresada en porcentaje, de la cantidad real de energía eléctrica generada entre la cantidad neta que podría generar si estuviera operando a la totalidad de su capacidad neta instalada¹³⁸.

$$\text{Factor de carga} = \text{Potencia real} / \text{Potencia neta instalada}$$

Debido a la naturaleza variable del viento, la probabilidad de que no esté disponible en un tiempo dado es alta. Siendo su factor de carga muy bajo comparado con otras tecnologías.

El factor de carga del viento varía de acuerdo con el lugar y tipo de turbina. Generalmente es de alrededor del 30%. En la tabla 5.3 se presentan valores típicos del factor de carga para las diferentes tecnologías de generación de energía eléctrica.

¹³⁶ Barrere, M, op. cit, pag

¹³⁷ The Power of the Wind, Web

¹³⁸ Can we rely on the wind?, Web

Tecnología de generación	Factor de carga
Carbón	65-85%
Hidroeléctrica	30-50%
Ciclo combinado (gas - vapor)	70-85%
Gas de relleno sanitario	70-90%
Nucleoeléctrica	65-85%
Biomasa	85-90%
Mareas	25%
Eólica	25-40%

Tabla 5.3 Factor de carga para diferentes tecnologías de generación de energía eléctrica.

Como este recurso es variable y no es 100% confiable, no es capaz de mantener en forma continua el suministro de energía eléctrica, por lo que se recomienda que estos sistemas apoyen a la red de distribución cuando mucho en un 20% de la demanda mínima del sistema.¹³⁹

5.3.3. Ventajas y Desventajas de los sistemas eólicos

Ventajas:

1. No emiten ningún tipo de gas a la atmósfera.
2. Al no emitir CO₂ a la atmósfera, contribuye positivamente a combatir el problema del calentamiento global del planeta.
3. Tampoco emite gases promotores de la lluvia ácida (NO_x, SO₂).
4. No generan residuos tóxicos ni de difícil tratamiento o eliminación.
5. Es inagotable ya que se trata de una forma de energía renovable.
6. Es factible la implantación de pequeñas estaciones en áreas rurales.
7. No tiene las limitantes del ciclo de Carnot ya que la conversión de la energía cinética del viento a mecánica es directa.
8. Actualmente se dispone de tecnología bien desarrollada en este campo.

¹³⁹ Enkerlin, Ernesto C., et. al, CIENCIA AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE, páginas 229-231

9. Las máquinas grandes, del orden de MW, se pueden conectar a la red de distribución donde se amortigua la variabilidad de este recurso.
10. La energía del viento no está sujeta a incrementos de precio o interrupciones en el suministro de energéticos.
11. La capacidad de una granja de viento se puede crecer conforme se vaya necesitando.
12. La instalación de turbinas de viento es relativamente rápida.
13. Al área donde se instala la granja eólica se le pueden dar usos simultáneos como es la agricultura y la ganadería.
14. Al instalar los sistemas de distribución local se evitan los costos asociados con su transmisión a grandes distancias.
15. Puede ser la única manera económica de suministrar electricidad a comunidades instaladas en islas.
16. El tamaño relativamente pequeño de las unidades de viento disminuye el riesgo de falla en el suministro de grandes cantidades de energía comparado con unidades generadoras de gran tamaño como las nucleares y de carbón.

Desventajas:

1. No es fácil almacenarla.
2. Presentan problemas de ruido en la zona donde se instalan (ondas de sonido audibles y de baja frecuencia).
3. El viento es variable por lo que hay que adaptar los aparatos a esta fuente aleatoria.
4. Por lo anterior, no puede suplir al 100% la generación de energía eléctrica, el recomendable es de un 20%.
5. Debido a la baja densidad del aire, es necesario construir máquinas grandes y caras.
6. Se requieren áreas muy grandes para la instalación de una granja eólica. Para producir 1 MW de electricidad se necesitan 17 acres (6.9 ha).
7. Muertes de aves debido a colisiones con las turbinas y cables.
8. El efecto visual en el paisaje podría no ser aceptado por la comunidad.

5.3.4 Costo de la energía eólica

El costo de la energía eléctrica generada a partir de la eólica depende de la velocidad del viento, la distancia de la conexión a la red de distribución más cercana y del costo de financiamiento del proyecto. Los costos de generación de energía a partir del viento han bajado sustancialmente desde que la primera turbina de viento comercial fue instalada y seguirán bajando como resultado de las economías de escala en la fabricación de las turbinas de viento y el desarrollo de tecnologías más eficientes. Basta decir que desde 1980 los costos han disminuido en cuatro veces su valor original. En 1993 era de 7.5 centavos de

dólar por kW-h, actualmente la Comisión de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica estima que con las nuevas tecnologías el costo se reducirá a 3.5 centavos de dólar por kW-h¹⁴⁰. En el Reino Unido se genera con precios de hasta 6.23 centavos de dólar por cada kW·h.

El viento es una de las fuentes renovables de energía más baratas. Además también es más barata que la obtenida mediante plantas nucleares, es comparable con plantas nuevas de carbón y más cara que una de gas¹⁴¹.

En la tabla 5.4 se comparan los costos de generación de energía eléctrica por cada kW-h de diferentes fuentes renovables de energía¹⁴². Como se puede observar, la energía eólica en cuanto a precio es competitiva con respecto a las demás fuentes renovables de energía.

Fuente renovable	Costo de la electricidad US ¢ / kW·h
Viento	5.92 – 6.52
Hidroeléctrica	5.06 – 6.16
Gas de relleno sanitario	5.14
Combustión de desechos	5.44
Gas de aguas residuales	9.22
Biomasa	5.9

Tabla 5.4 Costos de generación por fuentes renovables de energía.

Las turbinas nuevas tienen un costo entre 950 y 1050 US \$ / kW para capacidades de 500 a 600 kW y de \$ 750 - 1300 dólares / kW para capacidades mayores a 1 MW¹⁴³, con una

¹⁴⁰ Wind Energy in California, Web

¹⁴¹ The Power of the Wind, Web

¹⁴² Why Wind Energy is Getting Cheaper, Web

¹⁴³ BTM Consult ApS – MW WTG, Web

vida útil esperada de entre 20 y 30 años¹⁴⁴, con la ventaja de tener costos de operación y mantenimiento menores a los de las plantas convencionales.

Se espera que en el futuro los costos de generar energía eléctrica a partir de fuentes renovables lleguen a ser competitivos con los sistemas convencionales de acuerdo a la tendencia que han presentado en los últimos años tal y como se puede observar en la figura 5.10¹⁴⁵.

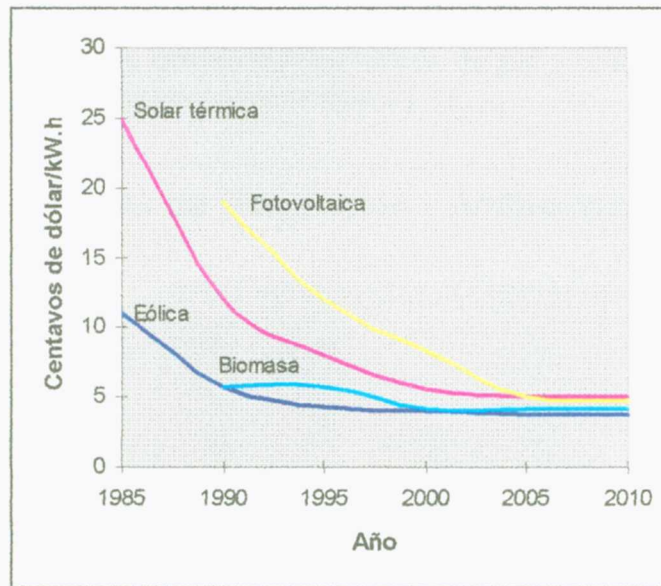


Figura 5.10 Tendencia en los costos de fuentes de energía renovable.

5.3.5. Costos ambientales.

Todos los sistemas de generación de energía eléctrica tienen costos ambientales que no se reflejan en el precio de la electricidad. Estos los absorbe la sociedad y no el productor de energía. Algunos ejemplos de costos ambientales son:

- Daños a la salud pública por la contaminación del aire.
- Enfermedades ocupacionales y problemas de salud atribuibles a la minería (extracción de carbón y el uranio).
- Daños causados por la lluvia ácida a edificios, agricultura, industria del pescado y a los ecosistemas

¹⁴⁴ Renewable Energy: Wind, Web

¹⁴⁵ Weinberg, Carl J. Et. al. Energy from the Sun. Scientific American. Pag. 104

- Disturbios y desastres a escala mundial como resultado del cambio climático provocado por el calentamiento global del planeta.

Se han hecho intentos de poner precio a los daños ambientales pero se han encontrado muchas dificultades. Sin embargo lo que sí se ha concluido es que hay costos ambientales significativos debidos a los sistemas de generación nucleares y de carbón, mientras que los relativos a los sistemas eólicos son temporales y reversibles y no entran en conflicto con el desarrollo sostenible. La British Wind Energy Association presenta un estimado de los costos totales de generación y los costos ambientales estimados para plantas generadoras nucleares, de carbón, de ciclo combinado con turbina de gas y eólicas, todas instaladas con nuevas tecnologías, estos se presentan en la figura 5.11.

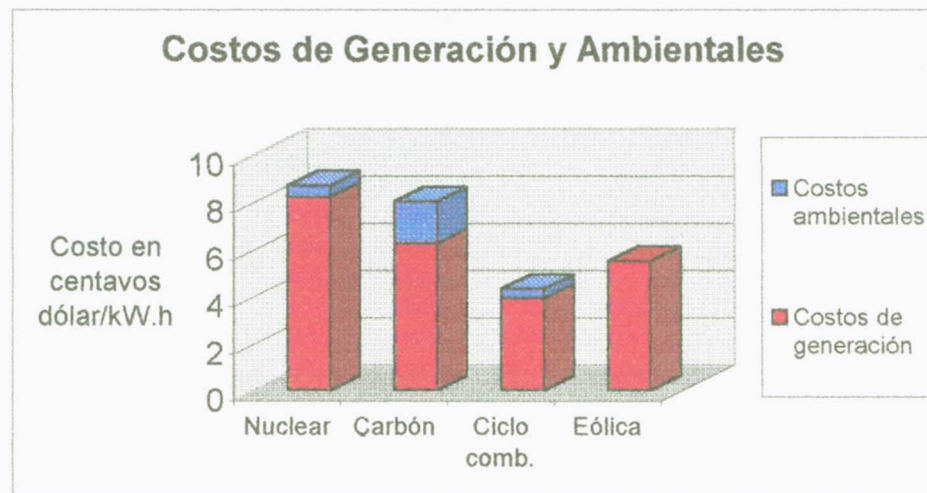


Figura 5.11 Comparativo de costos de generación y ambientales.

5.3.6 Beneficios ambientales

Los beneficios ambientales esperados de los sistemas eólicos se tendrán en la medida en que la generación de energía eléctrica mediante esta tecnología sustituya la instalación de plantas termoeléctricas y/o nucleoeeléctricas, disminuyendo así el consumo de combustibles y la emisión de contaminantes.

Solamente una fracción de la capacidad instalada de un sistema eólico se puede aprovechar para sustituir otras tecnologías debido a su variabilidad. Dicha fracción corresponde al factor de carga, que en el caso de los sistemas eólicos tiene un valor típico de

0.3. Esto significa que por cada 100 MW de energía eólica instalada, se podrán reemplazar 30 MW producidos por una planta de generación convencional e incluso con una mayor capacidad eólica instalada se podrá evitar la instalación de una o más plantas termoeléctricas o nucleoeeléctricas.

En términos de gases contaminantes emitidos a la atmósfera, se puede estimar la reducción en emisiones considerando que las emisiones típicas de las plantas de potencia son: para el CO_2 , 936 – 1079 gramos/kW•h; para el SO_2 , 14 – 16.4 gramos/kW•h; y para los NO_x 2.5 – 5.3 gramos/kW•h¹⁴⁶. Considerando el valor mínimo de estos, se puede estimar la reducción en emisiones mediante las siguientes relaciones:

$$\text{Reducción de } CO_2 = 936 \times 0.3 \times \dot{W}$$

$$\text{Reducción de } SO_2 = 14 \times 0.3 \times \dot{W}$$

$$\text{Reducción de } NO_x = 2.5 \times 0.3 \times \dot{W}$$

En donde \dot{W} es la capacidad eólica instalada, y el 0.3 es el factor de carga.

Si la potencia se expresa en MW y se quiere obtener la reducción de emisiones durante un año en kg, será necesario incluir un factor de conversión de 8.7, el cual incluye la conversión de horas a años, MW a kW y gramos a toneladas.

Esto significa que por cada MW de energía eólica instalada, se dejarán de emitir:

$$CO_2 = 936 \times 0.3 \times 8.7 \times 1 = 2443 \text{ toneladas / año}$$

$$SO_2 = 14 \times 0.3 \times 8.7 \times 1 = 36.5 \text{ toneladas / año}$$

$$NO_x = 2.5 \times 0.3 \times 8.7 \times 1 = 6.5 \text{ toneladas / año}$$

La disminución de emisiones de estos contaminantes para mayores capacidades de generación eólica se pueden ver en la figura 5.12 donde se presenta en forma gráfica.

¹⁴⁶ Calculating Environmental Benefits, Web

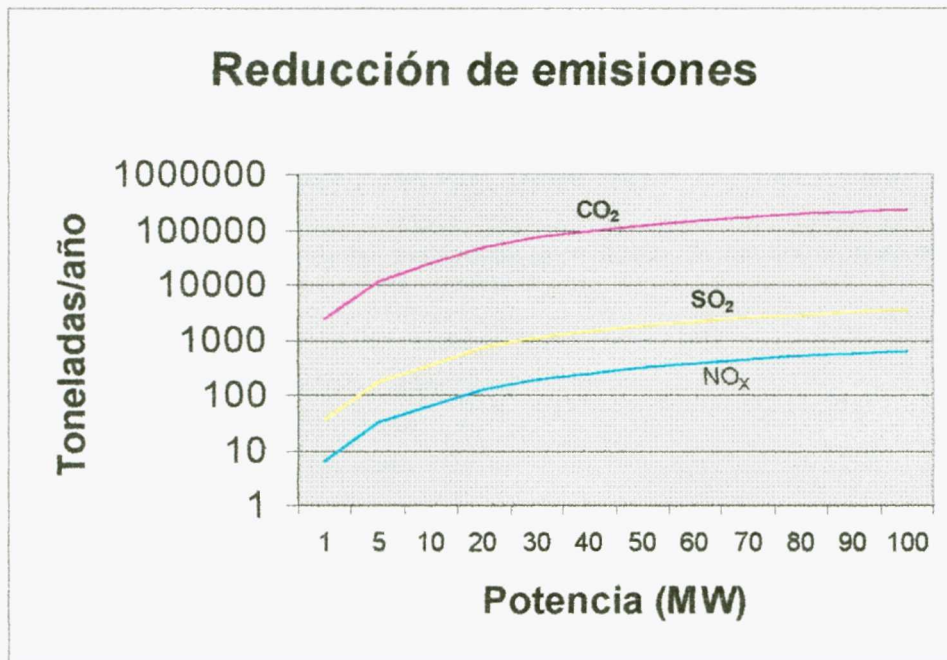


Figura 5.12 Reducción de emisiones de gases contaminantes en función de la potencia eólica instalada.

Tomando como ejemplo el caso de la central eólica de La Venta en el estado de Oaxaca, se puede calcular los ahorros en energéticos y disminución de emisiones partiendo de la capacidad instalada y la potencial.

La capacidad instalada actual es de 1575 kW (1.575 MW)¹⁴⁷, por lo que se evitará la producción mediante otros medios de aproximadamente $1575 \times 0.3 = 472.5$ kW.

Si estos se fueran a generar en una planta de ciclo combinado cuya eficiencia térmica es del 50%, esto implicaría un suministro de calor proveniente de la combustión de un combustible de:

$$Q = \frac{\dot{W}}{\eta} = \frac{472.5 \text{ Kw}}{0.5} = 945 \text{ kJ/s} = 2.98 \times 10^{10} \text{ kJ/año}$$

Si ésta consume gas natural, cuyo poder calorífico es de 46,000 kJ/kg (ver tabla 2.4) entonces el ahorro de combustible es:

$$\text{Ahorro} = \frac{2.98 \times 10^{10} \text{ kJ/año}}{46000 \text{ kJ/kg}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} = 648 \text{ ton/año}$$

¹⁴⁷ Enkerlin, Ernesto C., et. al, CIENCIA AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE, páginas 229-231

De acuerdo con la información presentada en el capítulo 2, las emisiones de CO₂ para el caso del gas natural se verían reducidas en (2.796 kg CO₂/kg GN, tabla 2.5):

$$\text{Reducción de } CO_2 = (648 \text{ ton/año})(2.796 \text{ ton } CO_2/\text{ton GN}) = 232 \text{ ton } CO_2/\text{año}$$

En general, para el promedio de las plantas de generación, la disminución en emisiones es de:

$$CO_2 = 2443 \times 1.575 = 3848 \text{ ton } CO_2 / \text{año}$$

$$SO_2 = 36.5 \times 1.575 = 57.5 \text{ ton } CO_2 / \text{año}$$

$$NO_x = 6.5 \times 1.575 = 10.2 \text{ ton } CO_2 / \text{año}$$

La diferencia en el CO₂ se debe a que en promedio seguramente se consideran plantas de generación con eficiencias menores al 50% y combustibles de otra composición que producen CO₂ en cantidades mayores a las que produce el gas natural, por ejemplo una carboeléctrica.

Si se llegan a instalar los 2000 MW estimados de capacidad existente en esta zona, el ahorro será de 823,000 toneladas de gas natural cada año y se dejarían de emitir 295,000 toneladas de CO₂ anualmente. Esto (Enkerlin, Ernesto C. Et al) representa poco más del 10% del consumo de la CFE durante 1993, unos once millones de barriles de petróleo anuales.

En vista de estos resultados y con vistas al de desarrollo sostenible, es recomendable que se le dé prioridad al aprovechamiento de este recurso que puede dar apoyo al sistema de distribución de energía eléctrica nacional, se lograrían importantes ahorros en energéticos y de esta manera México también estaría aportando a la humanidad una disminución real en el consumo de combustibles, en las emisiones de CO₂ y de otros contaminantes .

5.3.7 Solución híbrida

Una propuesta de solución a la problemática que presentan por un lado los sistemas fotovoltaicos y eólicos en cuanto a su naturaleza intermitente y el almacenamiento de la energía, y por otra parte el excelente desempeño de las celdas de combustión, consistiría en integrar un sistema híbrido compuesto por las tres tecnología expuesta en el presente capítulo.

Una manera de almacenar la energía es en forma de energía química, tal y como se almacena la energía radiante solar en la vegetación. En forma similar, la energía eléctrica que

se obtiene de los sistemas fotovoltaicos y eólico puede convertir el agua, mediante un proceso electroquímico, en hidrógeno y oxígeno puros. Estos pueden ser almacenados y utilizados posteriormente como combustibles en celdas de combustión instaladas en el lugar donde se requiere la energía eléctrica.

Los requerimientos del lugar donde se instalen estos sistemas es la disponibilidad de agua y condiciones adecuadas de viento para los sistemas eólicos y de insolación para el fotovoltaico.

El sistema híbrido propuesto se presenta esquemáticamente en la figura 5.13

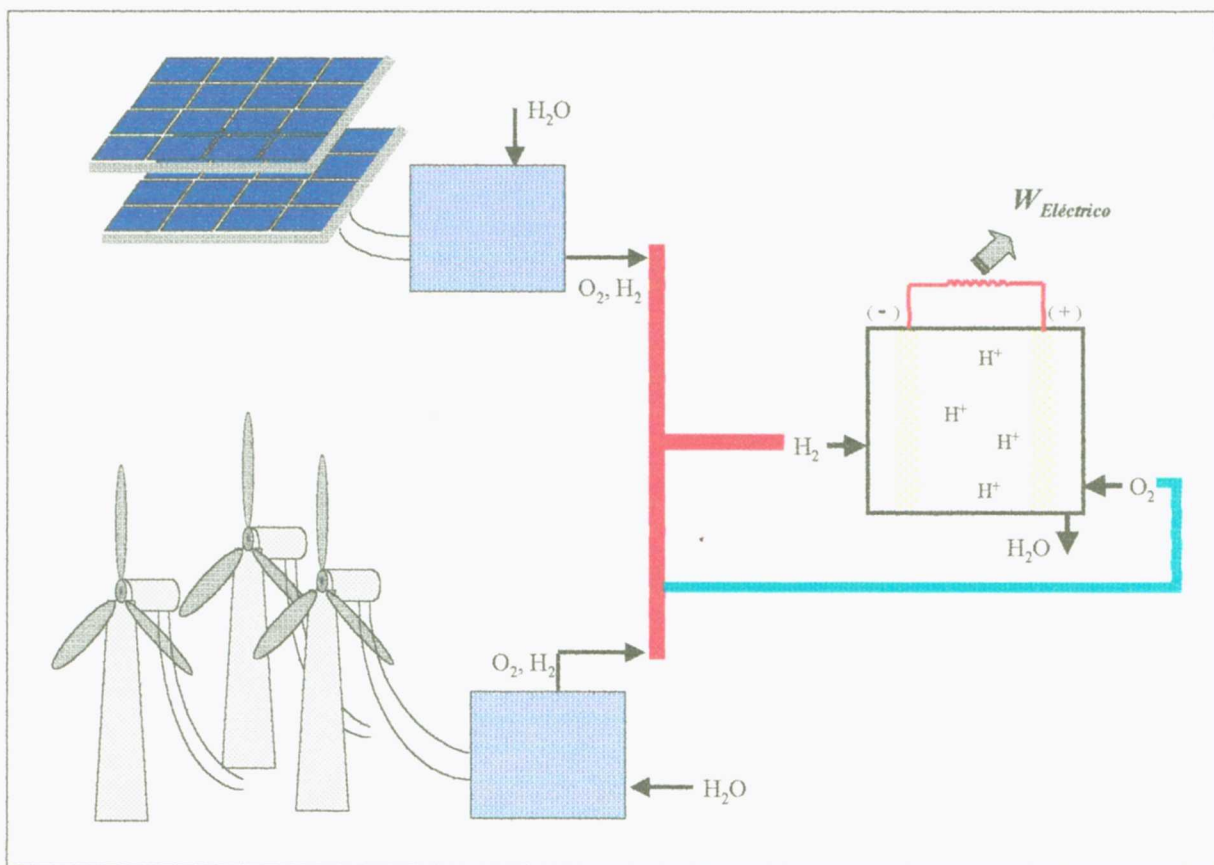


Figura 5.13 Sistema híbrido Celda Combustión – Fotovoltaica – Eólica.

Algunas ventajas que representaría este sistema híbrido son:

- El transporte del hidrógeno y el oxígeno es menos costoso que el tendido de líneas de transmisión.¹⁴⁸

¹⁴⁸ Solar Energy: Conversion into Electricity, Web

- Las celdas de combustión tienen un desempeño muy superior cuando el oxidante es directamente oxígeno comparado con aire.
- El impacto ambiental en el trayecto de la tubería será menor que el de una línea de transmisión.
- La tubería queda bajo tierra, y las líneas de transmisión no.
- Se aprovechan fuentes de energía renovables que de otra manera se desperdiciarían.
- El agua que se utiliza para obtener el hidrógeno y el oxígeno no se desperdicia, ya que los productos de la celda de combustión es agua.
- Este sistema también sería un sistema de transporte de agua a la vez que energía. No sólo se transportaría hidrógeno y oxígeno, sino que a la vez se estaría llevando agua al lugar donde se consume la energía eléctrica (una casa, una ranchería, una industria, etc.).
- El costo de la instalación y transporte de los gases se comparten con el de agua.

CONCLUSIONES

Como resultado de la investigación realizada se ha logrado obtener un documento que contiene los elementos adecuados para complementar el contenido de los cursos relativos a termodinámica o ingeniería térmica en los que se enseñan los principios de funcionamiento de las máquinas térmicas y los ciclos de producción de energía.

Con los elementos proporcionados en el presente estudio se podrá dar un panorama más amplio respecto a los sistemas de generación de energía ya que no solamente se tratan los balances de energía y eficiencias térmicas de los ciclos, sino que además se tratan las relaciones que tienen con los contaminantes asociados a estos sistemas, sus efectos dañinos, las consecuencias que pueden tener a nivel local, regional o global y los costos asociados a estos sistemas y costos ambientales.

Las tendencias mostradas para la implementación de nuevas tecnologías de generación de energía más eficientes y a precios competitivos con las actuales, señalan que algunas ya están disponibles como la geotermia y la eólica, otras se esperan para principios de la década del 2000 al 2010, por lo que los estudiantes que tomen los cursos con el enfoque del presente trabajo, estarán capacitados para elegir entre diferentes sistemas de generación de energía, con criterios de eficiencia, contaminación, costo, renovabilidad del recurso y efectos de los contaminantes.

Con respecto a los motores de combustión interna:

De los resultados obtenidos en cuanto a emisiones de NO y reactividad de los hidrocarburos se puede concluir que si se pretende utilizar la disminución de NOx como estrategia para abatir el ozono urbano, no sería recomendable la sustitución de combustibles, ya que de acuerdo a los resultados, los combustibles alternos como el gas natural y el gas L.P. emiten más NO que la gasolina, a excepción del metanol en una determinada relación aire-combustible. Sin embargo, si la estrategia consiste en disminuir los hidrocarburos reactivos en la atmósfera, entonces sí conviene sustituir la gasolina por algún combustible alternativo.

De la viabilidad se puede concluir que mientras dispongamos de los combustibles provenientes del petróleo, una muy buena opción es reemplazar la gasolina por gas LP, ya que el segundo presenta emisiones menores de hidrocarburos reactivos.

A largo plazo se deben enfocar los esfuerzos de la investigación en desarrollar tecnologías que optimicen la producción de metanol a partir de biomasa para obtener así un sustituto renovable de los derivados del petróleo.

Se evaluó el desempeño de diferentes combustibles comparando sus características inherentes y su viabilidad.

Como aspectos de viabilidad se consideró: costo, disponibilidad, seguridad, almacenamiento y renovabilidad.

Las características inherentes al combustible consideradas fueron: eficiencia térmica, densidad de energía, emisiones de CO₂, formación térmica de CO y NO y reactividad.

El mejor combustible por su densidad de energía resultó ser el hidrógeno, con 21.6 kW-h/kg, en segundo lugar estuvieron las gasolinas, el gas LP y el gas natural; los de menor densidad fueron los alcoholes.

La eficiencia térmica de los combustibles evaluados estuvo en el rango de 54.8 a 67.5%, siendo las mejores del gas natural y el hidrógeno, la menor corresponde a la gasolina.

En cuanto a las emisiones de bióxido de carbono, el hidrógeno tiene cero emisiones y el resto de los combustibles emiten entre 0.32 y 0.438 kg/kW-h.

La temperatura de combustión más alta alcanzada fue la del hidrógeno por lo que es el combustible que genera mayores cantidades de NO_x.

Para la eficiencia máxima, el hidrógeno es el que promueve la mayor formación térmica de NO, la gasolina y el metanol tienen las emisiones más bajas.

Para el CO, todos los combustibles tienen un desempeño muy similar (estando un poco abajo la gasolina), exceptuando el hidrógeno que tiene cero emisiones de este contaminante.

El orden de mayor a menor reactividad de los combustibles estudiados es: gasolina, gas LP, gas natural, alcoholes e hidrógeno.

El combustible más caro es el hidrógeno por una gran diferencia (más de 300 veces respecto a los demás). De los combustibles restantes, el más económico es el gas LP, seguido por la gasolina, metanol y etanol.

En México no es viable el tipo de almacenamiento requerido para el gas natural.

Es evidente que el hidrógeno es el combustible menos viable de las opciones que se han considerado, y aunque sus emisiones de CO e hidrocarburos son nulas, su alta temperatura

de combustión promueve la formación térmica de mayores cantidades de NO que el resto de los combustibles, además de ser el más peligroso y caro de los combustibles.

Cambiar a gas LP mientras los recursos del petróleo sean disponibles debido a que su menor reactividad y economía lo hacen más apto que la gasolina. Adicionalmente en México se cuenta ya con la tecnología para almacenar y llevar a cabo la conversión de los motores de gasolina a gas LP.

La estrategia recomendada a largo plazo es desarrollar la tecnología que reemplace el uso de gasolina y gas LP por alcohol metílico ya que este es renovable y menos contaminante.

De los sistemas de conversión de energía eléctrica:

Con pequeños aumentos en la eficiencia térmica, se pueden lograr aportaciones importantes al desarrollo sostenible, ya que se logra una importante disminución de emisiones de contaminantes y consumo de combustibles en porcentaje comparada con el incremento logrado en eficiencia térmica.

De los combustibles disponibles en la región donde se pretende generar la energía eléctrica, utilizar el que emita menos contaminantes por unidad de energía (kW.h). Por ejemplo, entre carbón y gas natural, es preferible el uso de gas natural.

En lugares donde se disponga de recursos abundantes de un energético como el carbón, utilizar las tecnologías que den las más altas eficiencias para su aprovechamiento, y de esta manera emitir la menor cantidad de contaminantes por unidad de energía utilizada.

Se deberá aprovechar al máximo el contenido energético de los combustibles intercalando tecnologías como el ciclo combinado y la cogeneración.

Enfocar los esfuerzos de investigación en el desarrollo de tecnologías que permitan el aprovechamiento eficiente de los recursos naturales abundantes, especialmente el carbón y el petróleo.

Aprovechar las fuentes renovables de la región, como son la eólica, solar térmica, solar fotovoltaica, geotérmica y biomasa, generando la mayor proporción posible de energía eléctrica mediante estos medios para sustituir el uso de combustibles fósiles.

Cuando se estudie la instalación de una central de generación de energía, además de tomar en cuenta los costos de instalación de la planta y de los combustibles a utilizar, considerar siempre los costos ambientales.

El orden en que los combustibles emiten contaminantes a la atmósfera, de menor a mayor cantidad es: hidrógeno, nuclear, biomasa, gas natural, combustóleo, carbón.

Se podría establecer un impuesto ambiental con el fin de subsidiar tecnologías limpias y lograr que sean más competitivas frente a los sistemas convencionales. De esta manera, al incentivar la instalación de centrales que utilizan energéticos renovables, se obtendría una reducción en sus costos real por las economías de escala al incrementarse el volumen de producción y comercialización.

Trabajos Futuros:

1. El modelo teórico presentado para el análisis de motores de combustión interna se puede tomar como punto de partida para realizar una serie de experimentos utilizando los diferentes combustibles que se mencionan en el capítulo 2, con especial énfasis en el uso de alcoholes como combustible y variando las condiciones de operación. Que permita validar o afinar el modelo teórico, se genere información que sirva de base para llevar a cabo modificaciones de diseño en los motores de combustión interna que se adapten al uso de combustibles alternos y se disponga de información probada para la toma de decisiones cuando se trate de adoptar un programa de sustitución de combustibles o control de la contaminación atmosférica por vehículos.
2. Considerando que las celdas de combustión son una de las alternativas más prometedoras para la conversión de la energía química de los combustibles fósiles a electricidad, se propone el estudio teórico y experimental enfocado a la obtención de hidrógeno a partir de combustibles fósiles, especialmente de un sistema que utilice gasolina y pueda adaptarse a un automóvil. Se puede partir de las reacciones de gas de agua, analizar los mecanismos y proponer nuevas alternativas. Otra opción es analizar los trabajos existentes para considerarlos como punto de partida. En Europa y los Estados Unidos se llevan a cabo programas serios de investigación en el campo de las celdas de combustión en diferentes instituciones con un buen apoyo financiero, por lo que otra opción es integrarse a uno de estos programas.
3. El contenido de azufre como se pudo apreciar a lo largo del trabajo, es uno de los principales problemas que presentan los combustibles por los efectos dañinos que tiene en los equipos y la contaminación que produce. Se plantea llevar a cabo un estudio sobre la situación de los combustibles mexicanos, en especial del combustóleo. Contenidos de azufre, emisiones de SO_2 , propuesta de un programa de minimización de emisiones ya sea con equipo de tratamiento antes de la combustión o de los gases de escape de la chimenea.

APENDICE A

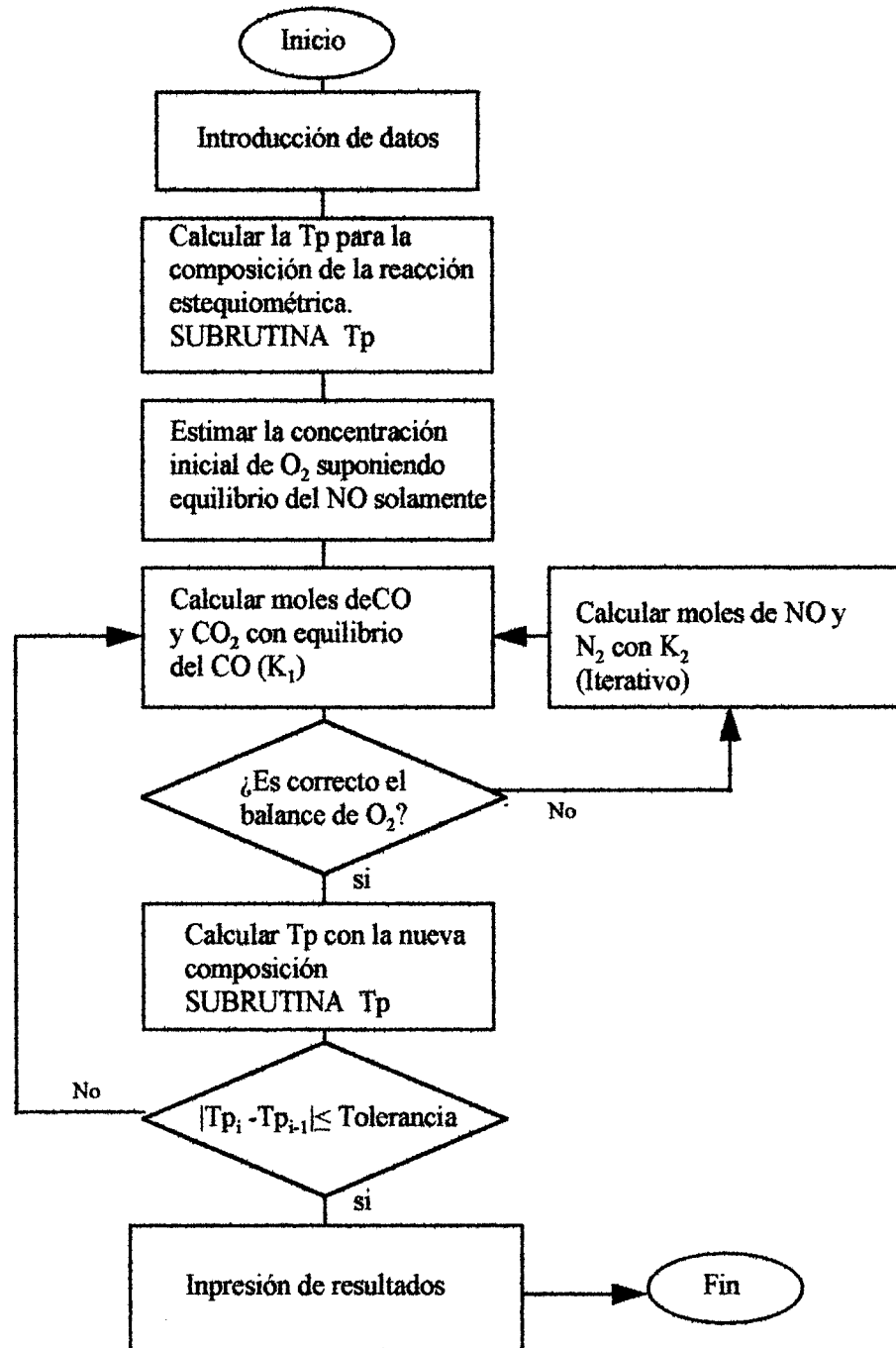
Tabla D-11 EXPRESIONES PARA CALOR ESPECIFICO MOLAR A PRESION CONSTANTE PARA GASES IDEALES COMUNES.

GAS	$\bar{c}_{p0} = \text{kJ/kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{K}$ donde $\theta = T(\text{Kelvin})/100$	ESCALA, K	ERROR MAX. %
N ₂	$\bar{c}_{p0} = 39.060 - 512.790\theta^{-1.5} + 1072.70\theta^{-2} - 820.400\theta^{-3}$	300-3500	0.43
O ₂	$\bar{c}_{p0} = 37.432 + 0.0201020\theta^{1.5} - 178.570\theta^{-1.5} + 236.880\theta^{-2}$	300-3500	0.30
H ₂	$\bar{c}_{p0} = 56.505 - 702.740\theta^{-0.75} + 1165.00\theta^{-1} - 560.700\theta^{-1.5}$	300-3500	0.60
CO	$\bar{c}_{p0} = 69.145 - 0.704630\theta^{0.75} - 200.770\theta^{-0.5} + 176.760\theta^{-0.75}$	300-3500	0.42
OII	$\bar{c}_{p0} = 81.546 - 59.3500\theta^{0.25} + 17.3290\theta^{0.75} - 4.26600$	300-3500	0.43
NO	$\bar{c}_{p0} = 59.283 - 1.70960\theta^{0.5} - 70.6130\theta^{-0.5} + 74.8890\theta^{-1.5}$	300-3500	0.34
H ₂ O	$\bar{c}_{p0} = 143.05 - 183.540\theta^{0.25} + 82.7510\theta^{0.5} - 3.69890$	300-3500	0.43
CO ₂	$\bar{c}_{p0} = -3.7357 + 30.5290\theta^{0.5} - 4.10340 + 0.0241980\theta^2$	300-3500	0.19
NO ₂	$\bar{c}_{p0} = 46.045 + 216.100\theta^{-0.5} - 363.660\theta^{-0.75} + 232.5500\theta^{-2}$	300-3500	0.26
CH ₄	$\bar{c}_{p0} = -672.87 + 439.740\theta^{0.25} - 24.8750\theta^{0.75} + 323.880\theta^{-0.5}$	300-2000	0.15
C ₂ H ₄	$\bar{c}_{p0} = -95.395 + 123.150\theta^{0.5} - 35.6410\theta^{0.75} + 182.770\theta^{-3}$	300-2000	0.07
C ₂ H ₆	$\bar{c}_{p0} = 6.895 + 17.260 - 0.64020\theta^2 + 0.007280\theta^3$	300-1500	0.83
C ₃ H ₈	$\bar{c}_{p0} = -4.042 + 30.460 - 1.5710\theta^2 + 0.031710\theta^3$	300-1500	0.40
C ₄ H ₁₀	$\bar{c}_{p0} = 3.954 + 37.120 - 1.8330\theta^2 + 0.034980\theta^3$	300-1500	0.54

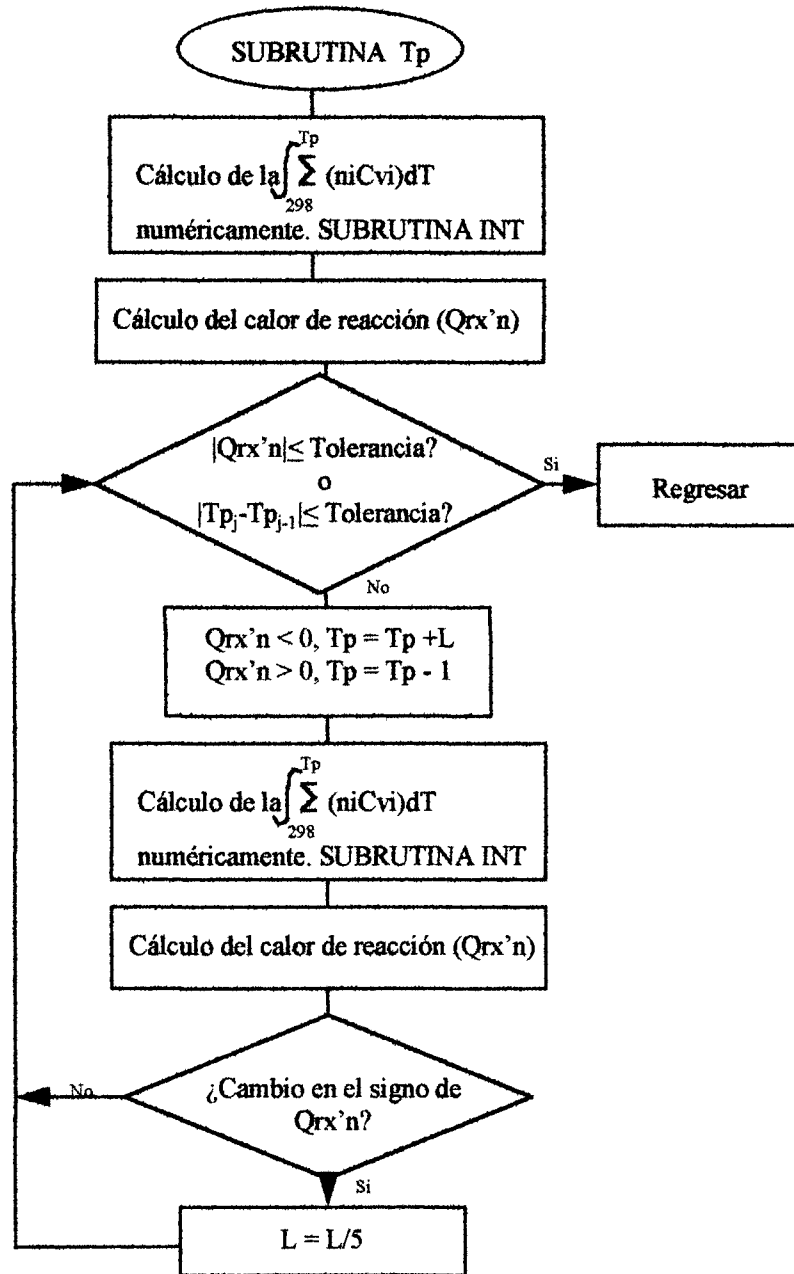
Fuente: T.C. Scott y R.E. Sonntag, Universidad de Michigan, sin publicar (1971), excepto C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀ de *Refinado de Petróleo* por K.A. Kobe 28(2):113 (1949).

ANEXO 1

Programa para el cálculo de la composición en equilibrio de los productos resultantes de la combustión.



Subrutina para el cálculo de la temperatura de combustión adiabática (T_p).




```

Sub Command1_Click ()
' Programa para obtener la composicion en equilibrio y de
' la temperatura de combustion.
' Componentes: combustible, CxHyOz
' Productos: CO2, CO, H2O, NO, N2, O2
' Abril de 1997
'
cx = Val(InputBox("Contenido de carbon en el combustible"))
cy = Val(InputBox("Contenido de hidrogeno en el combustible"))
cz = Val(InputBox("Contenido de oxigeno en el combustible"))
tr = Val(InputBox("Temperatura de los reactantes"))
rc = Val(InputBox("Relacion de compresion"))
hc = Val(InputBox("Calor de formacion en kJ/kg-mol"))
mm = Val(InputBox("Masa molecular del combustible"))
cg = Val(InputBox("Moles de combustible en el estado gas"))
cc = Val(InputBox("Cp del combustible, kJ/kg.K"))
ex = Val(InputBox("% de exceso de aire"))
printer.Print
50 n1 = cx: n3 = cy / 2
no = (cx + n3 / 2 - cz / 2) * (1 + ex / 100): n6 = 3.76 * no
k4 = 3.76 * no
tf = tr: Call integral: rr = area + (mm * cc - 8.314) - (tr - 298): area = 0
' Dar valro inicial a Tp = 3000 K
tp = 3000
Call temprod: tq = tp
Call cttes
' estimacion de moles de O2
n6 = k4 / (1 + 2 * k3 * k3)
n4 = k4 - n6
n5 = 2 * n4: m5 = n5: m6 = n6
' Calculo de moles de CO2 y CO
100 nm = cx + cy / 2 + n4 + n5 + n6
n1 = cx / (1 + k1 * Sqr(nm / n5))
n2 = cx - n1
' Balance de oxigeno
n5 = (k2 - (n1 + n4) / 2 + m5) / 2
If Abs(n5 - m5) >= .001 Then m5 = n5: GoTo 150
Call temprod
If Abs(tp - tq) <= 10 Then GoTo 300
Call cttes: tq = tp
' Calculo de moles de NO y N2
150 n6 = k4 - k3 * Sqr(n5 * n6)

```

```

If Abs(n6 - m6) <= .0001 Then n4 = k4 - n6: GoTo 100
m6 = n6: GoTo 50
GoTo 50
' Impresion de resultados
300 printer.Print : printer.Print "Resultados finales";
printer.Print : printer.Print "Temperatura de los productos="; tp
printer.Print : printer.Print "Moles de CO2="; n1
printer.Print : printer.Print "Moles de CO="; n2
printer.Print : printer.Print "Moles de H2O="; n3
printer.Print : printer.Print "Moles de NO="; n4
printer.Print : printer.Print "Moles de NO2="; n6
printer.Print : printer.Print "Moles de O2="; n5
End

```

Sub integral ()

```
'Subrutina para calcular una integral numerica
```

```
' Subrutina para el calculo de una integral numerica
```

```
' xa =paso de integracion
```

```
area = 0: t = 298: xa = 100
```

```
div = (tf - 298) / xa
```

```
n1 = Int(div)
```

```
' calculo de f1(en T= 298K)
```

```
call fdet
```

```
t = t * xa
```

```
For i = 1 To ni + 1
```

```
If i = ni + 1 Then t = tf: xa = (div - ni) * xa
```

```
Call fdet
```

```
b = Abs(f1 - f2)
```

```
If f1 > f2 Then a = f2: Else a = f1
```

```
area = area + xa * a + xa * b / 2
```

```
t = t + xa
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

sub fdet ()

```
' subrutina para evaluar la funcion en t
```

```
te = t / 100
```

```
f1 = f2
```

```
c1 = n1 * (-12.0497 + 30.529 * sqrt(te) - 4.1031 * te + .024198 * te * te)
```

```
c2 = n2 * (60.831 - .70463 * (te)^ 0.75 - 200.77 / Sqr(te) + 176.76 / (te)^ 0.75)
```

```
c3 = n3 * (134.176 - 183.54 * (te)^ 0.25 + 82.751 * Sqr(te) - 3.6989 * te)
```

```
c4 = n4 * (50.969 - 1.7096 * Sqr(te) ^ (-70.613) / Sqr(te) + 74.889 / (te) ^ 1.5)
```

```
c5 = n5 * (29.118 + .20102 * (te)^ 1.5 - 178.57 / (te) ^ 1.5 + 236.88 / (te * te))
```

```

c6 = n6 * (30.746 - 512.79 / (te) ^ 1.5 + 1072.7 / (te * te) - 820.4 / (te * te * te))
f2 = c1 + c2 + c3 + c4 + c5 + c6
End Sub

```

```

Sub entalpia ()
' subrutina para calcular la entalpia de reaccion estandar (DH)

```

```

dh = -393520 * n1 - 110530 * n2 - 241820 * n3 + 90419 * n4 - hc
End Sub

```

```

Sub temprod ()
' subrutina para evaluar la temperatura de los productos

```

```

l = 100: tx = 0
tf = tp
Call integral
ap = area: area = 0
dg = 2477.572 * (n1 + n2 + b3 + n4 + n5 + n6 - cg - 4.76 * no)
Call entalpia
printer.Print : printer.Print "DH, AP, RR, DG"; ap, rr, dg
fh = dh + ap - rr - dg
bb = Sgn(fh)
5000 If Abs(fh) <= 100 Or Abs(tp - tx) < 2 Then End Sub
tx = tp
If fh < 0 Then tp = tp + l: GoTo 5100
tp = tp - l
5100 tf = tp: Call integral: ap = area
fh = dh + ap - rr - dg
printer.Print : printer.Print "TP="; tp: printer.Print "fh="; fh
ir bb <> Sgn(fh), Then l = l / 5: bb = Sgn(fh)
GoTo 5000

```

```

Sub cttes ()
' Subrutina para el calculo de constantes

```

```

k1 = 30000 * Sqr(tr / rc + 1.4 / tp) * Exp(-33719.2 / tp)
k2 = no + (cz - cx) / 2 - cy / 4
k3 = 4.69 - Exp(-10870.66 / tp)
End Sub

```

Resultados obtenidos mediante el programa de computadora para la eficiencia máxima de los combustibles:

Gasolina 92 octano

T reactantes:	633 K	Calor de formación del comb (kJ/kgmol) =	-225,184
Rel. de comp.	7.26	Cp del combustible (kJ/kg·K) =	1.65

% Ex. Aire		0	15	30	50	80
CO ₂	mol/mol comb	6.0265	7.1020	7.5851	7.8849	7.9754
H ₂ O	mol/mol comb	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000
O ₂	mol/mol comb	0.6743	1.7928	3.2709	5.5410	9.1554
N ₂	mol/mol comb	44.4963	50.9744	57.5817	66.6482	80.3010
CO	mol/mol comb	1.9735	0.8980	0.4149	0.1151	0.0246
NO	mol/mol comb	0.6237	0.9136	1.0743	1.0318	0.9150

TP	K	2920	2796	2652	2436	2203
	°C	2647	2523	2379	2163	1930

CO	ppm	31936	12887	5324	1290	231
NO	ppm	10093	13111	13786	11565	8602

CO	gr/kg de comb	493.37	224.50	103.73	28.78	6.15
NO	gr/kg de comb	167.06	244.71	287.76	276.37	245.09

CO	gr/kW-h	68.3899	31.1200	14.3783	3.9888	0.8525
NO	gr/kW-h	23.1581	33.9221	39.8890	38.3109	33.9741

Gasolina 100 de octano

T reactantes:	702 K	Calor de formación del comb (kJ/kgmol) =	-225,184
Rel. de comp.	8.376	Cp del combustible (kJ/kg·K) =	1.65

% Ex. Aire		0	15	30	50	80
CO ₂	mol/mol comb	5.9110	6.9837	7.5293	7.8458	7.9673
H ₂ O	mol/mol comb	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000
O ₂	mol/mol comb	0.7081	1.8178	3.2648	5.5017	9.1078
N ₂	mol/mol comb	44.4483	50.9061	57.5162	66.5279	80.1976
CO	mol/mol comb	2.0890	1.0163	0.4707	0.1542	0.0327
NO	mol/mol comb	0.6717	0.9819	1.1398	1.1521	1.0184

TP	K	2960	2836	2692	2500	2253
	°C	2687	2563	2419	2227	1980

CO	ppm	33787	14580	6041	1729	308
NO	ppm	10864	14086	14628	12919	9578

CO	gr/kg de comb	522.25	254.08	117.68	38.55	8.18
----	---------------	--------	--------	--------	-------	------

NO	gr/kg de comb	179.92	263.01	305.30	308.60	272.79
----	---------------	--------	--------	--------	--------	--------

CO	gr/kW-h	72.3939	35.2197	16.3120	5.3438	1.1332
NO	gr/kW-h	24.9403	36.4581	42.3210	42.7777	37.8134

Etanol

T reactantes:	665 K	Calor de formación del comb (kJ/kgmol) =				-225.184
Rel. de comp.	7.44	Cp del combustible (kJ/kg-K) =				1.65

% Ex. Aire		0	15	30	50	80
CO ₂	mol/mol comb	1.5168	1.7744	1.8921	1.9637	1.9921
H ₂ O	mol/mol comb	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
O ₂	mol/mol comb	0.1658	0.4501	0.8197	1.3807	2.2816
N ₂	mol/mol comb	11.1294	12.7448	14.3943	16.6441	20.0577
CO	mol/mol comb	0.4832	0.2256	0.1079	0.0363	0.0079
NO	mol/mol comb	0.1506	0.2272	0.2698	0.2759	0.2463

TP	K	2908	2793	2649	2469	2237
	°C	2635	2520	2376	2196	1964

CO	ppm	29381	12246	5268	1558	286
NO	ppm	9157	12333	13171	11841	8929

CO	gr/kg de comb	294.12	137.32	65.68	22.10	4.81
NO	gr/kg de comb	98.22	148.17	175.96	179.93	160.63

CO	gr/kW-h	69.1076	32.2654	15.4319	5.1916	1.1299
NO	gr/kW-h	23.0774	34.8153	41.3432	42.2779	37.7421

Metanol

T reactantes:	743	Calor de formación del comb (kJ/kgmol) =				-225.184
Rel. de comp.	9.82	Cp del combustible (kJ/kg-K) =				1.65

% Ex. Aire		0	15	30	50	80
CO ₂	mol/mol comb	0.7526	0.8786	0.9375	0.9766	0.9941
H ₂ O	mol/mol comb	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000
O ₂	mol/mol comb	0.0839	0.2255	0.4079	0.6842	1.1305
N ₂	mol/mol comb	5.5602	6.3647	7.1849	8.3045	10.0067
CO	mol/mol comb	0.2474	0.1214	0.0625	0.0234	0.0059
NO	mol/mol comb	0.0798	0.1213	0.1471	0.1555	0.1453

TP	K	2951	2843	2709	2540	2318
	°C	2678	2570	2436	2267	2045

CO	ppm	28359	12501	5819	1927	413
NO	ppm	9147	12490	13697	12804	10173

CO	gr/kg de comb	216.48	106.23	54.69	20.48	5.16
NO	gr/kg de comb	74.81	113.72	137.91	145.78	136.22

CO	gr/kW-h	61.6738	30.2635	15.5805	5.8333	1.4708
NO	gr/kW-h	21.3141	32.3985	39.2895	41.5331	38.8088

Gas Natural

T reactantes:	923	Calor de formación del comb (kJ/kgmol) =	-225,184
Rel. de comp.	16.6	Cp del combustible (kJ/kg-K) =	1.65

% Ex. Aire		0	15	30	50	80
CO ₂	mol/mol comb	0.8031	0.9842	1.0673	1.1196	1.1424
H ₂ O	mol/mol comb	2.1500	2.1500	2.1500	2.1500	2.1500
O ₂	mol/mol comb	0.1082	0.3150	0.5854	0.9974	1.6617
N ₂	mol/mol comb	8.2350	9.4167	10.6277	12.2873	14.8135
CO	mol/mol comb	0.3469	0.1658	0.0827	0.0304	0.0076
NO	mol/mol comb	0.1310	0.2048	0.2481	0.2617	0.2453

TP	K	3093	2964	2812	2624	2387
	°C	2820	2691	2539	2351	2114

CO	ppm	29463	12526	5603	1805	380
NO	ppm	11126	15472	16808	15534	12252

CO	gr/kg de comb	536.64	258.49	127.93	47.03	11.76
NO	gr/kg de comb	217.13	339.45	411.22	433.76	406.57

CO	gr/kW-h	62.1832	29.7203	14.8243	5.4493	1.3623
NO	gr/kW-h	25.1596	39.3334	47.6495	50.2615	47.1118

Gas LP

T reactantes:	714	Calor de formación del comb (kJ/kgmol) =	-225,184
Rel. de comp.	8.738	Cp del combustible (kJ/kg-K) =	1.65

% Ex. Aire		0	15	30	50	80
CO ₂	mol/mol comb	2.5385	3.0367	3.2943	3.4286	3.4845
H ₂ O	mol/mol comb	4.5000	4.5000	4.5000	4.5000	4.5000
O ₂	mol/mol comb	0.3207	0.8563	1.5551	2.6289	4.3577
N ₂	mol/mol comb	21.3014	24.3880	27.5590	31.8649	38.4150
CO	mol/mol comb	0.9615	0.4634	0.2057	0.0714	0.0152
NO	mol/mol comb	0.3186	0.4749	0.5470	0.5650	0.5010

TP	K	2972	2848	2700	2508	2265
	°C	2699	2575	2427	2235	1992

CO	ppm	32113	13743	5462	1658	296
NO	ppm	10641	14084	14524	13122	9771

CO	gr/kg de comb	527.88	254.42	112.93	39.20	8.35
NO	gr/kg de comb	187.41	279.35	321.76	332.35	294.71

CO	gr/kW-h	71.8207	34.6144	15.3651	5.3333	1.1354
NO	gr/kW-h	25.4982	38.0072	43.7775	45.2181	40.0960

Hidrógeno

T reactantes:	847	Calor de formación del comb (kJ/kgmol) =	-225,184
Rel. de comp.	13.62	Cp del combustible (kJ/kg-K) =	1.65

% Ex. Aire		0	15	30	50	80
CO ₂	mol/mol comb	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
H ₂ O	mol/mol comb	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
O ₂	mol/mol comb	0.0000	0.8563	1.5551	2.6289	4.3577
N ₂	mol/mol comb	1.8800	2.1097	2.3754	2.7449	3.3103
CO	mol/mol comb	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NO	mol/mol comb	0.0000	0.0523	0.0686	0.0751	0.0737

TP	K	3524	3258	3047	2821	2560
	°C	3251	2985	2774	2548	2287

CO	ppm	0	0	0	0	0
NO	ppm	0	13018	13722	11645	8431

CO	gr/kg de comb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NO	gr/kg de comb	0.00	784.65	1029.00	1126.50	1105.50

CO	gr/kW-h	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NO	gr/kW-h	0.0000	36.3264	47.6389	52.1528	51.1806

Resultados obtenidos mediante el programa de computadora para una misma relación de compresión:

Gasolina 92 de octano

T reactantes:	633 K	Calor de formación del comb (kJ/kgmol) =	-225,184
Rel. de comp.	7.26	Cp del combustible (kJ/kg·K) =	1.65

% Ex. Aire		0	15	30	50	80
CO ₂	mol/mol comb	6.0265	7.1020	7.5851	7.8849	7.9754
H ₂ O	mol/mol comb	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000
O ₂	mol/mol comb	0.6743	1.7928	3.2709	5.5410	9.1554
N ₂	mol/mol comb	44.4963	50.9744	57.5817	66.6482	80.3010
CO	mol/mol comb	1.9735	0.8980	0.4149	0.1151	0.0246
NO	mol/mol comb	0.6237	0.9136	1.0743	1.0318	0.9150

TP	K	2920	2796	2652	2436	2203
	°C	2647	2523	2379	2163	1930

CO	ppm	31936	12887	5324	1290	231
NO	ppm	10093	13111	13786	11565	8602

CO	gr/kg de comb	493.37	224.50	103.73	28.78	6.15
NO	gr/kg de comb	167.06	244.71	287.76	276.37	245.09

CO	gr/kW-h	68.3899	31.1200	14.3783	3.9888	0.8525
NO	gr/kW-h	23.1581	33.9221	39.8890	38.3109	33.9741

Etanol

T reactantes:	633 K	Calor de formación del comb (kJ/kgmol) =	-235,310
Rel. de comp.	7.26	Cp del combustible (kJ/kg·K) =	1.92

% Ex. Aire		0	15	30	50	80
CO ₂	mol/mol comb	1.5318	1.7758	1.8989	1.9664	1.9928
H ₂ O	mol/mol comb	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
O ₂	mol/mol comb	0.1610	0.4486	0.8191	1.3825	2.2843
N ₂	mol/mol comb	11.1336	12.7459	14.3998	16.6504	20.0642
CO	mol/mol comb	0.4682	0.2242	0.1011	0.0336	0.0072
NO	mol/mol comb	0.1464	0.2261	0.2642	0.2696	0.2398

TP	K	2899	2778	2638	2454	2222
	°C	2626	2505	2365	2181	1949

CO	ppm	28478	12171	4936	1441	261
NO	ppm	8905	12274	12898	11570	8692

CO	gr/kg de comb	284.99	136.47	61.54	20.45	4.38
NO	gr/kg de comb	95.48	147.46	172.30	175.83	156.39

CO	gr/kW-h	67.4523	32.2999	14.5652	4.8392	1.0373
NO	gr/kW-h	22.5976	34.8996	40.7806	41.6141	37.0143

Metanol

T reactantes:	743	Calor de formación del comb (kJ/kgmol) =	-225,184
Rel. de comp.	9.82	Cp del combustible (kJ/kg·K) =	1.65

% Ex. Aire		0	15	30	50	80
CO ₂	mol/mol comb	0.7526	0.8786	0.9375	0.9766	0.9941
H ₂ O	mol/mol comb	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000
O ₂	mol/mol comb	0.0839	0.2255	0.4079	0.6842	1.1305
N ₂	mol/mol comb	5.5602	6.3647	7.1849	8.3045	10.0067
CO	mol/mol comb	0.2474	0.1214	0.0625	0.0234	0.0059
NO	mol/mol comb	0.0798	0.1213	0.1471	0.1555	0.1453

TP	K	2951	2843	2709	2540	2318
	°C	2678	2570	2436	2267	2045

CO	ppm	28359	12501	5819	1927	413
NO	ppm	9147	12490	13697	12804	10173

CO	gr/kg de comb	216.48	106.23	54.69	20.48	5.16
NO	gr/kg de comb	74.81	113.72	137.91	145.78	136.22

CO	gr/kW-h	61.6738	30.2635	15.5805	5.8333	1.4708
NO	gr/kW-h	21.3141	32.3985	39.2895	41.5331	38.8088

Gas Natural

T reactantes:	633 K	Calor de formación del comb (kJ/kgmol) =	-76,324
Rel. de comp.	7.26	Cp del combustible (kJ/kg·K) =	2.08

% Ex. Aire		0	15	30	50	80
CO ₂	mol/mol comb	0.8639	1.0294	1.1009	1.1350	1.1471
H ₂ O	mol/mol comb	2.1500	2.1500	2.1500	2.1500	2.1500

O ₂	mol/mol comb	0.0950	0.3146	0.6000	1.0283	1.7020
N ₂	mol/mol comb	8.2695	9.4626	10.6916	12.3641	14.9000
CO	mol/mol comb	0.2861	0.1206	0.0491	0.0150	0.0029
NO	mol/mol comb	0.0965	0.1583	0.1842	0.1849	0.1587

TP	K	2895	2757	2602	2410	2170
	°C	2622	2484	2329	2137	1897

CO	ppm	24326	9112	3323	891	145
NO	ppm	8205	11960	12466	10958	7911

CO	gr/kg de comb	442.59	186.56	75.96	23.25	4.49
NO	gr/kg de comb	159.94	262.38	305.30	306.46	263.04

CO	gr/kW-h	63.1698	26.6280	10.8411	3.3186	0.6403
NO	gr/kW-h	22.8288	37.4486	43.5757	43.7413	37.5433

Gas LP

T reactantes:	714	Calor de formación del comb (kJ/kgmol) =	-225,184
Rel. de comp.	8.738	Cp del combustible (kJ/kg·K) =	1.65

% Ex. Aire		0	15	30	50	80
CO ₂	mol/mol comb	2.5385	3.0367	3.2943	3.4286	3.4845
H ₂ O	mol/mol comb	4.5000	4.5000	4.5000	4.5000	4.5000
O ₂	mol/mol comb	0.3207	0.8563	1.5551	2.6289	4.3577
N ₂	mol/mol comb	21.3014	24.3880	27.5590	31.8649	38.4150
CO	mol/mol comb	0.9615	0.4634	0.2057	0.0714	0.0152
NO	mol/mol comb	0.3186	0.4749	0.5470	0.5650	0.5010

TP	K	2972	2848	2700	2508	2265
	°C	2699	2575	2427	2235	1992

CO	ppm	32113	13743	5462	1658	296
NO	ppm	10641	14084	14524	13122	9771

CO	gr/kg de comb	527.88	254.42	112.93	39.20	8.35
NO	gr/kg de comb	187.41	279.35	321.76	332.35	294.71

CO	gr/kW-h	71.8207	34.6144	15.3651	5.3333	1.1354
NO	gr/kW-h	25.4982	38.0072	43.7775	45.2181	40.0960

Hidrógeno

T reactantes:	847	Calor de formación del comb (kJ/kgmol) =	-225,184
---------------	-----	---	----------

Rel. de comp.	13.62	Cp del combustible (kJ/kg·K) =	1.65
---------------	-------	--------------------------------	------

% Ex. Aire		0	15	30	50	80
CO ₂	mol/mol comb	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
H ₂ O	mol/mol comb	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
O ₂	mol/mol comb	0.0000	0.8563	1.5551	2.6289	4.3577
N ₂	mol/mol comb	1.8800	2.1097	2.3754	2.7449	3.3103
CO	mol/mol comb	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NO	mol/mol comb	0.0000	0.0523	0.0686	0.0751	0.0737

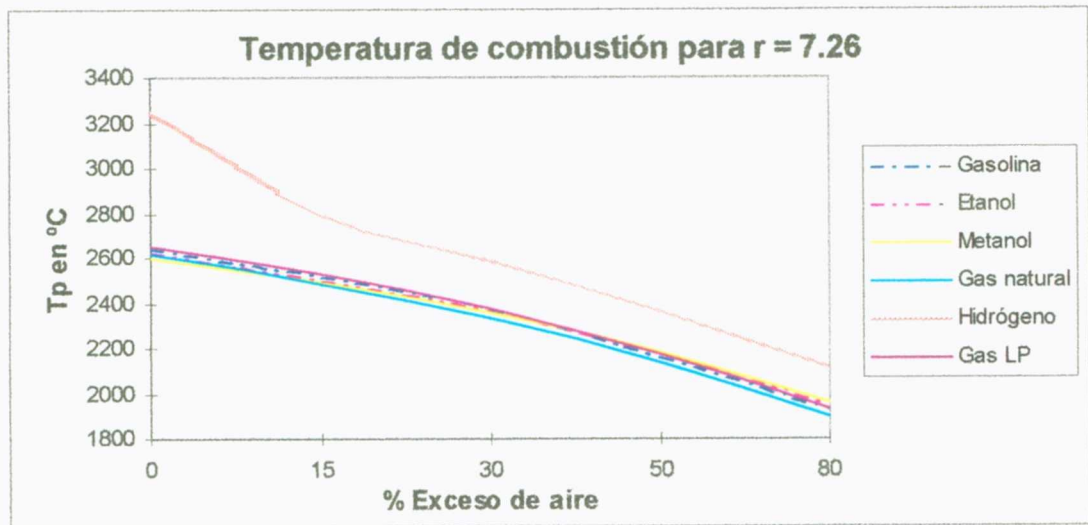
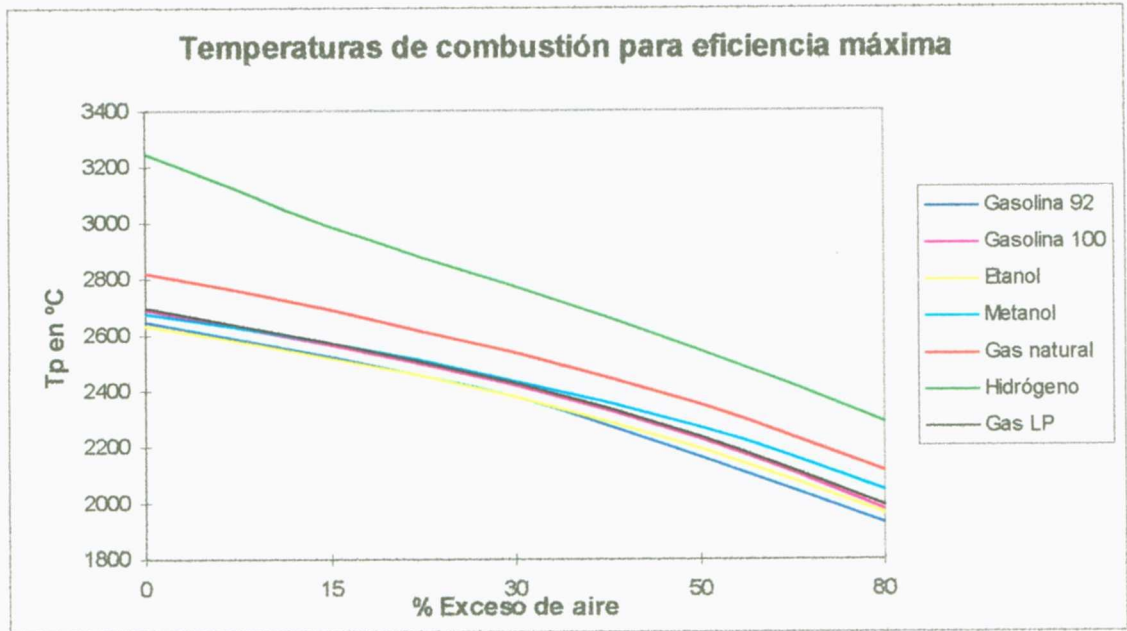
TP	K	3524	3258	3047	2821	2560
	°C	3251	2985	2774	2548	2287

CO	ppm	0	0	0	0	0
NO	ppm	0	13018	13722	11645	8431

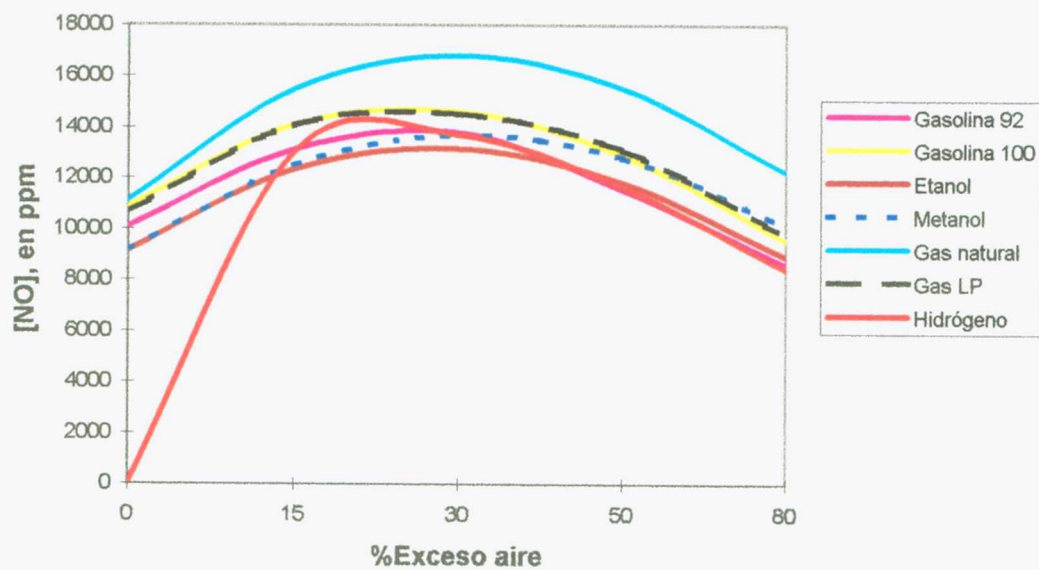
CO	gr/kg de comb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NO	gr/kg de comb	0.00	784.65	1029.00	1126.50	1105.50

CO	gr/kW-h	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NO	gr/kW-h	0.0000	36.3264	47.6389	52.1528	51.1806

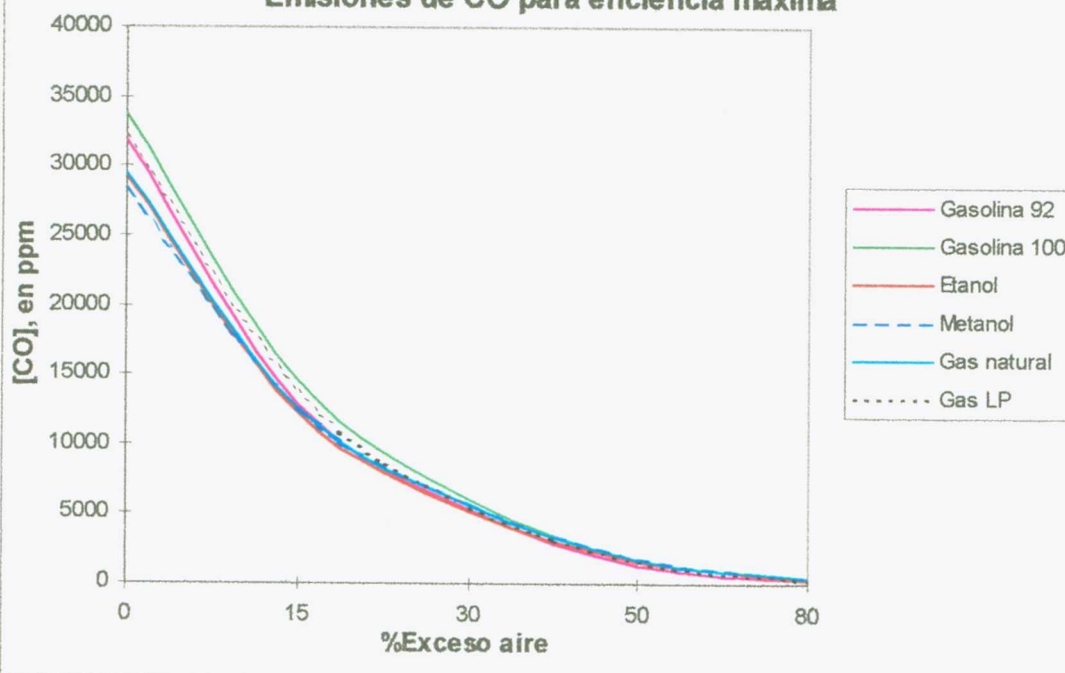
Gráficas:

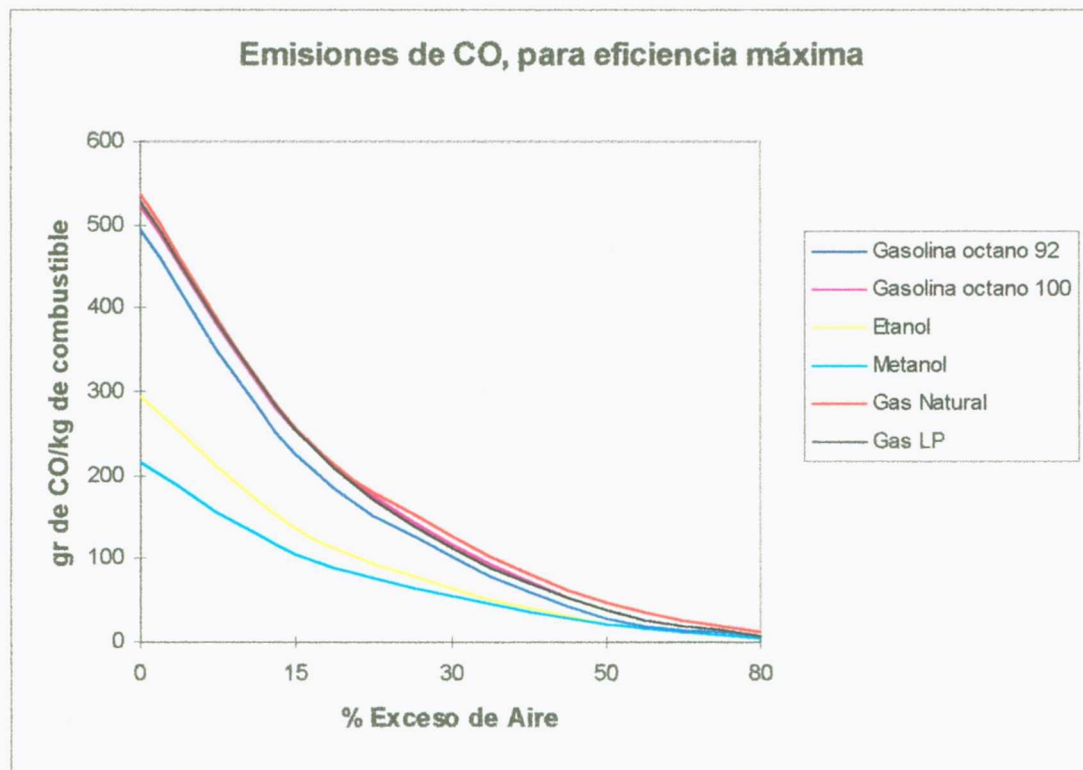
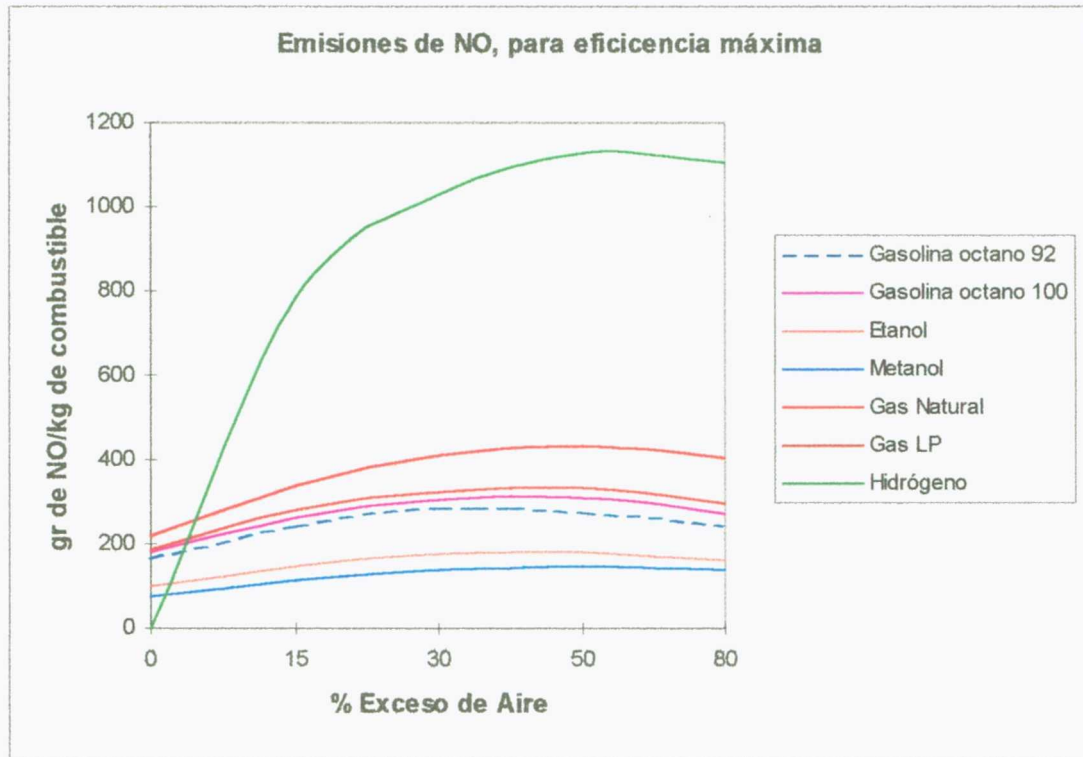


Emisiones de NO para eficiencia máxima

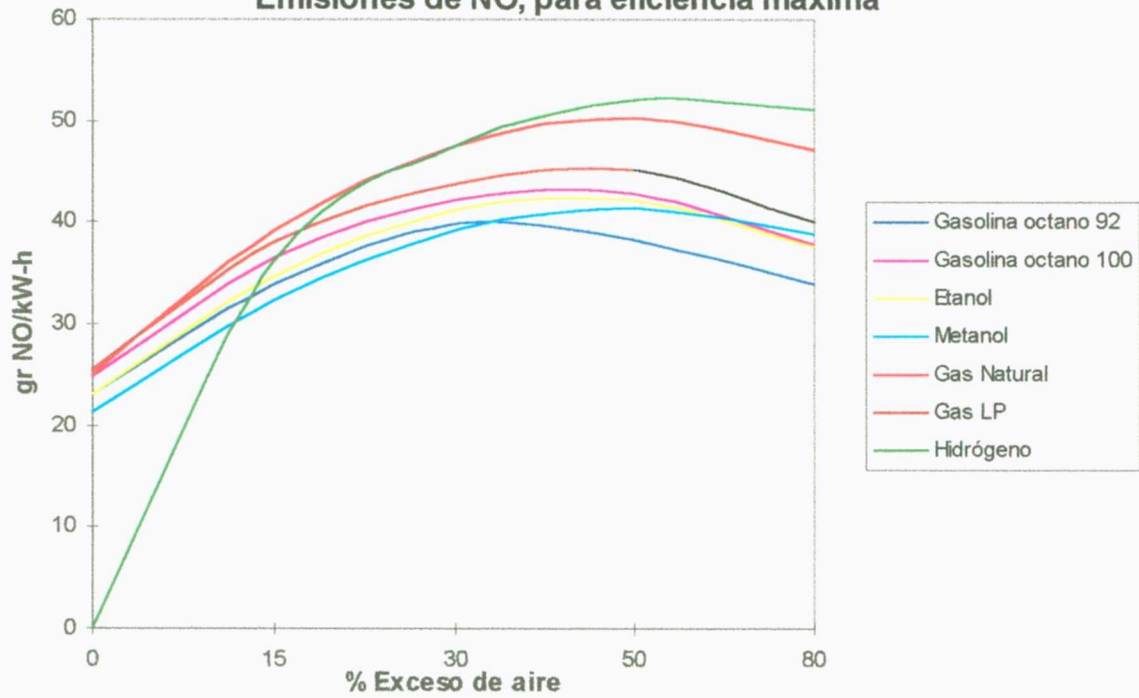


Emisiones de CO para eficiencia máxima

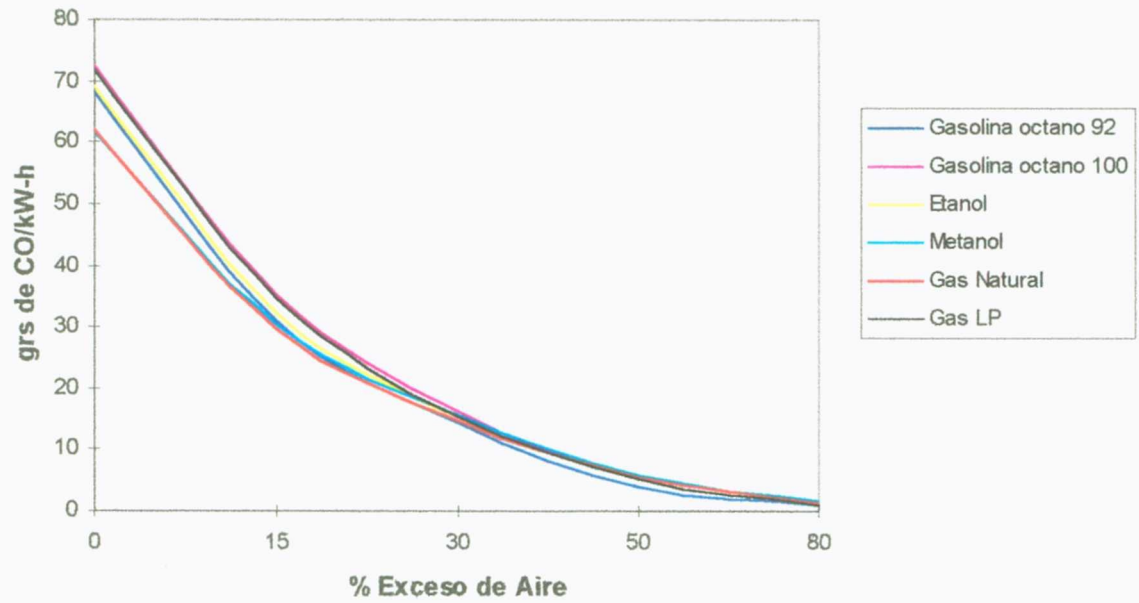


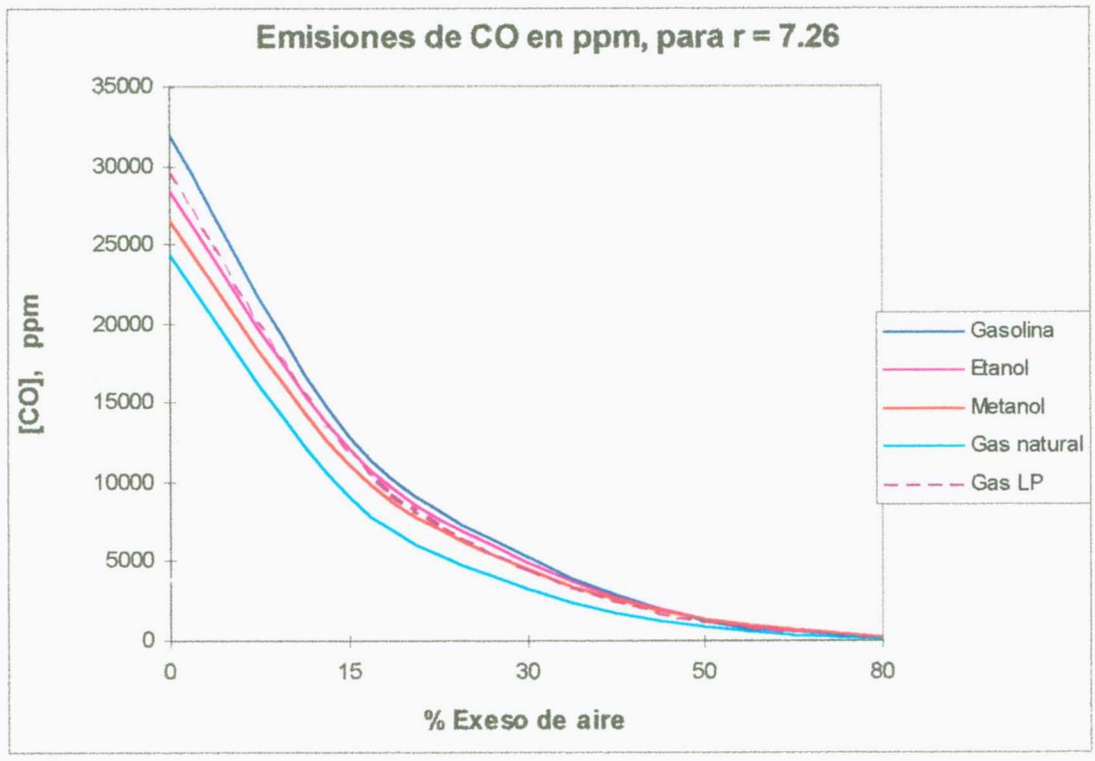
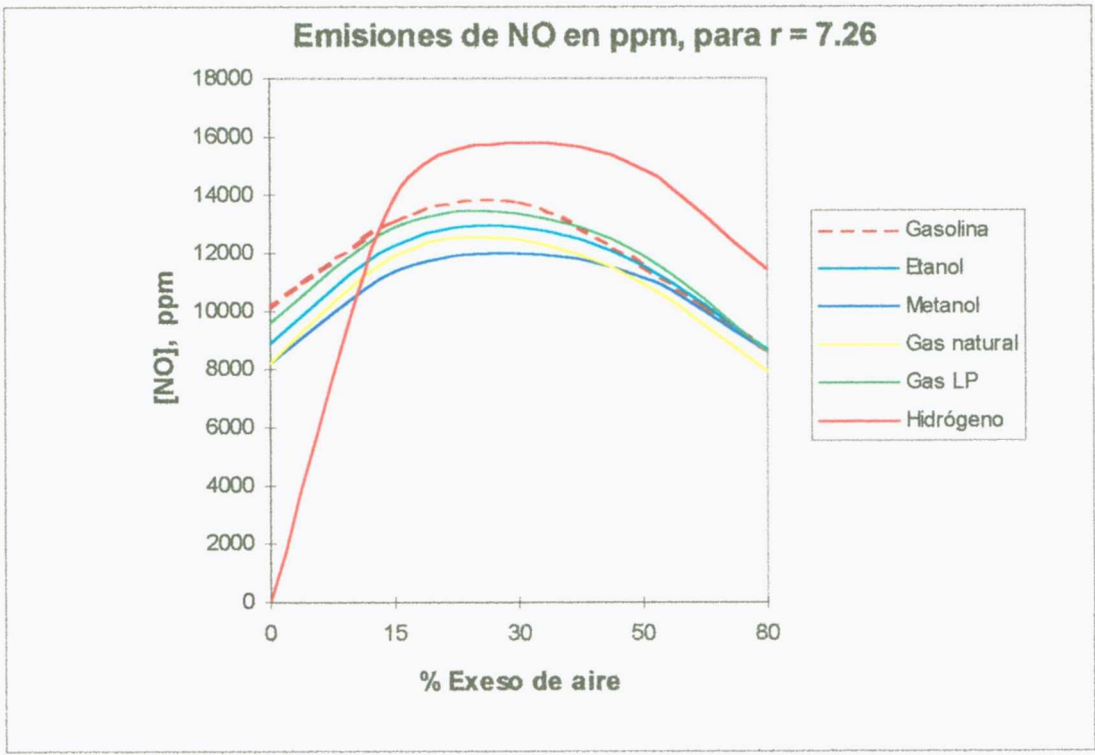


Emisiones de NO, para eficiencia máxima

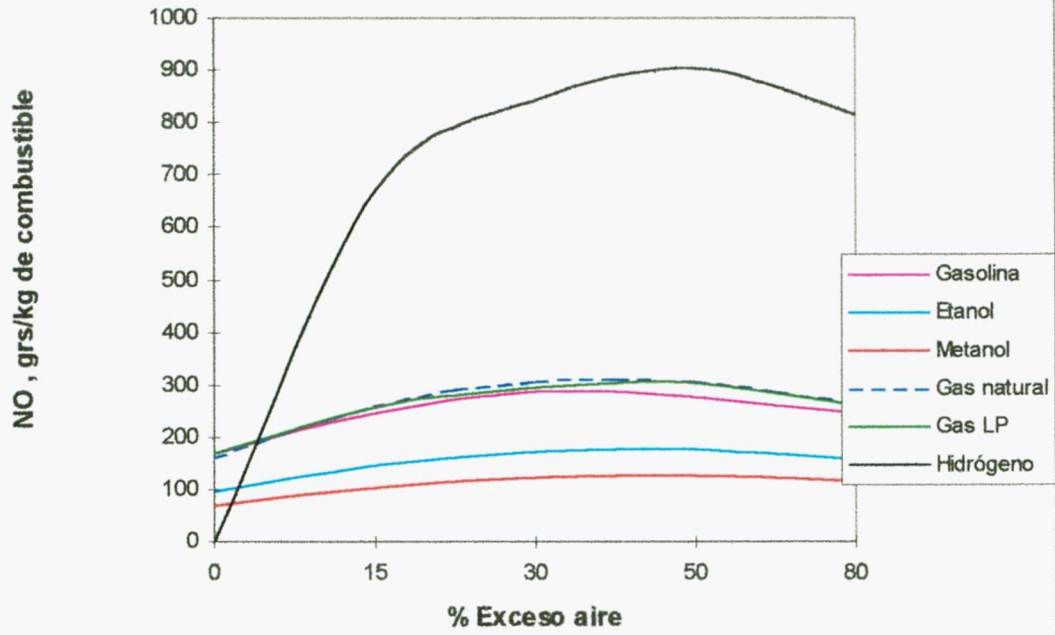


Emisiones de CO, para eficiencia máxima

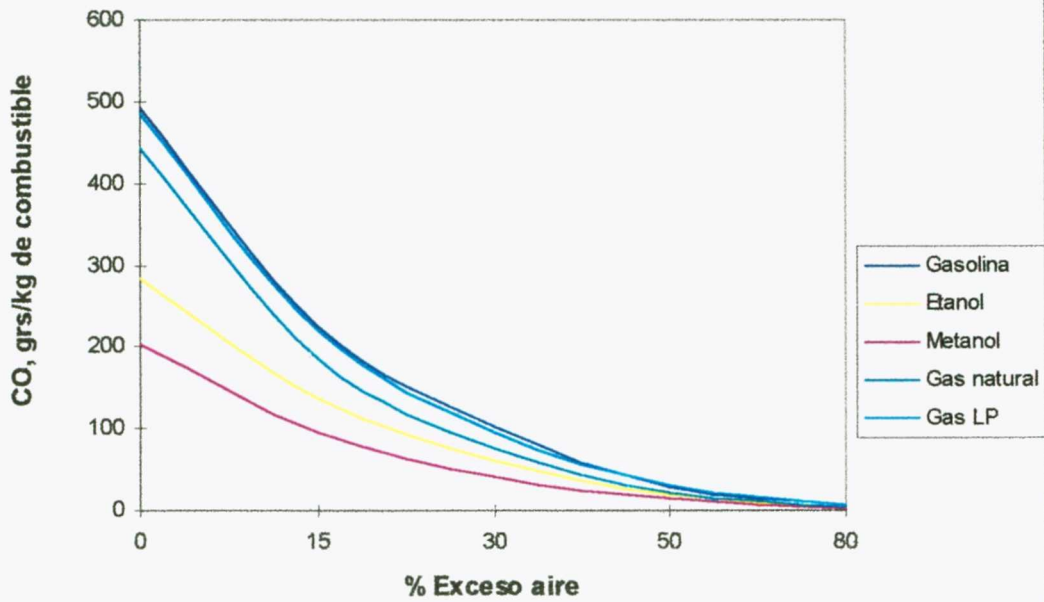


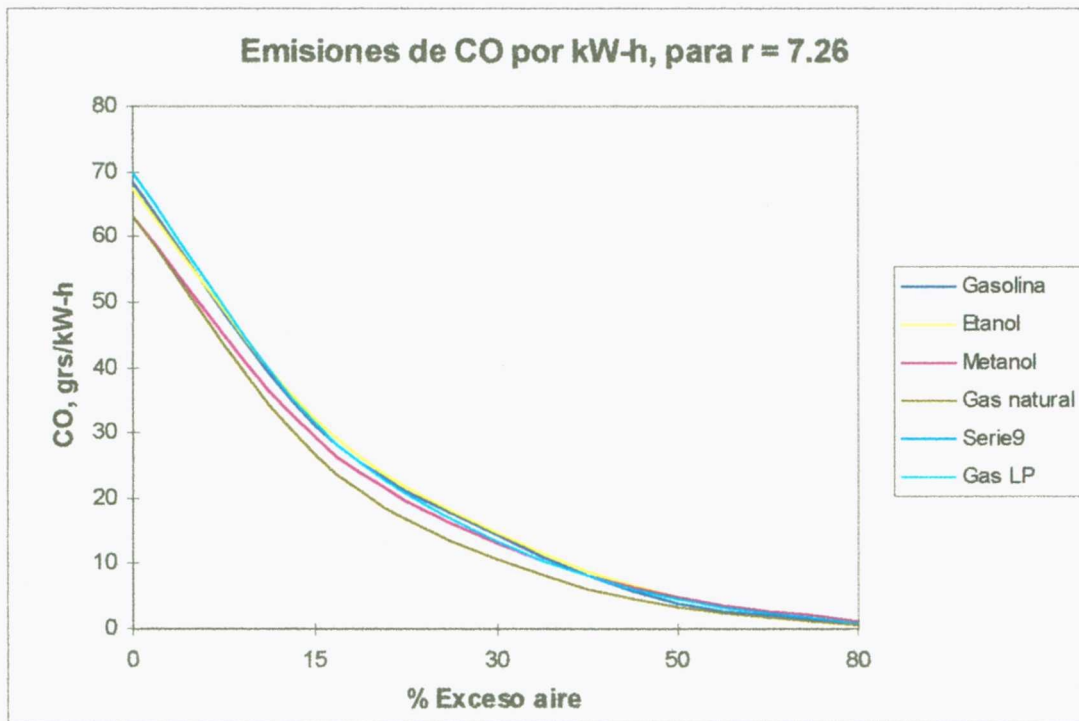
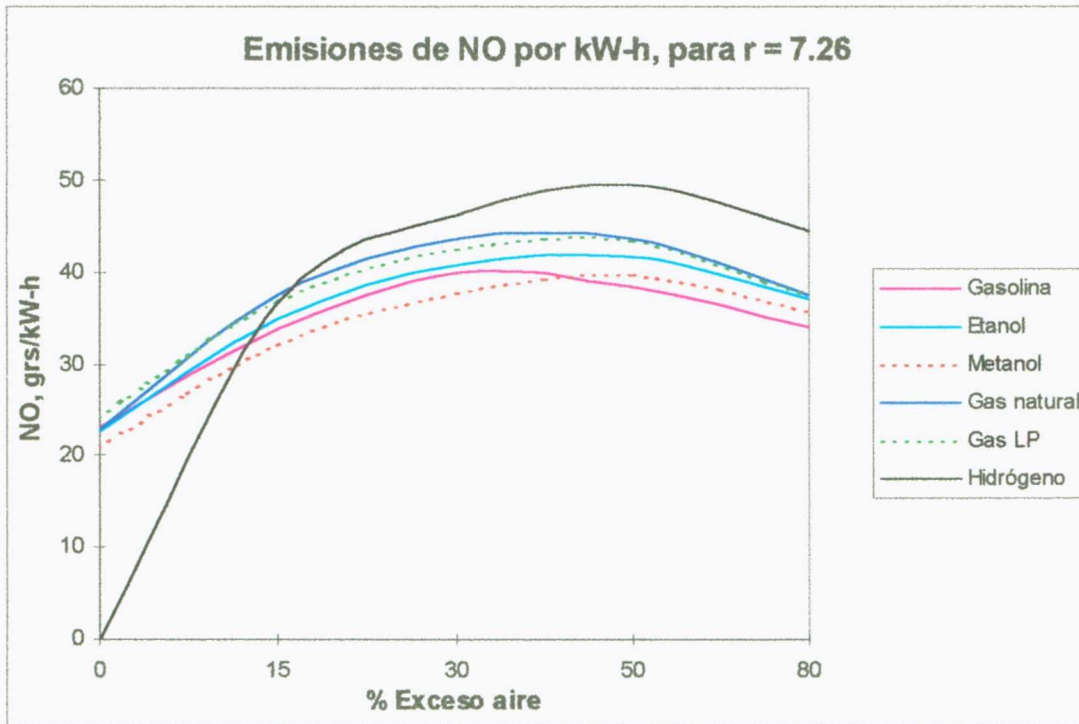


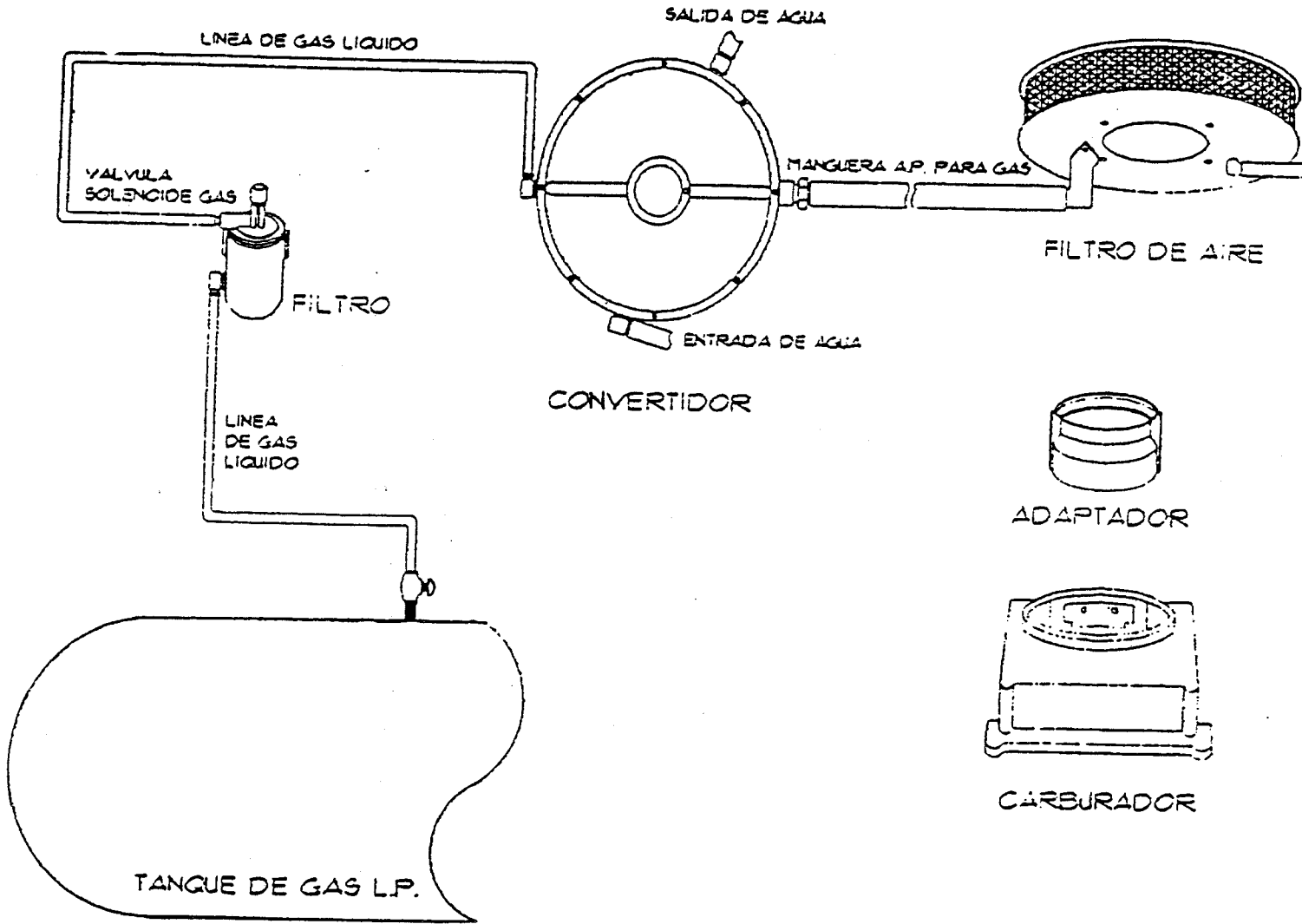
Emisiones de NO en gr/kg de combustible para $r = 7.26$



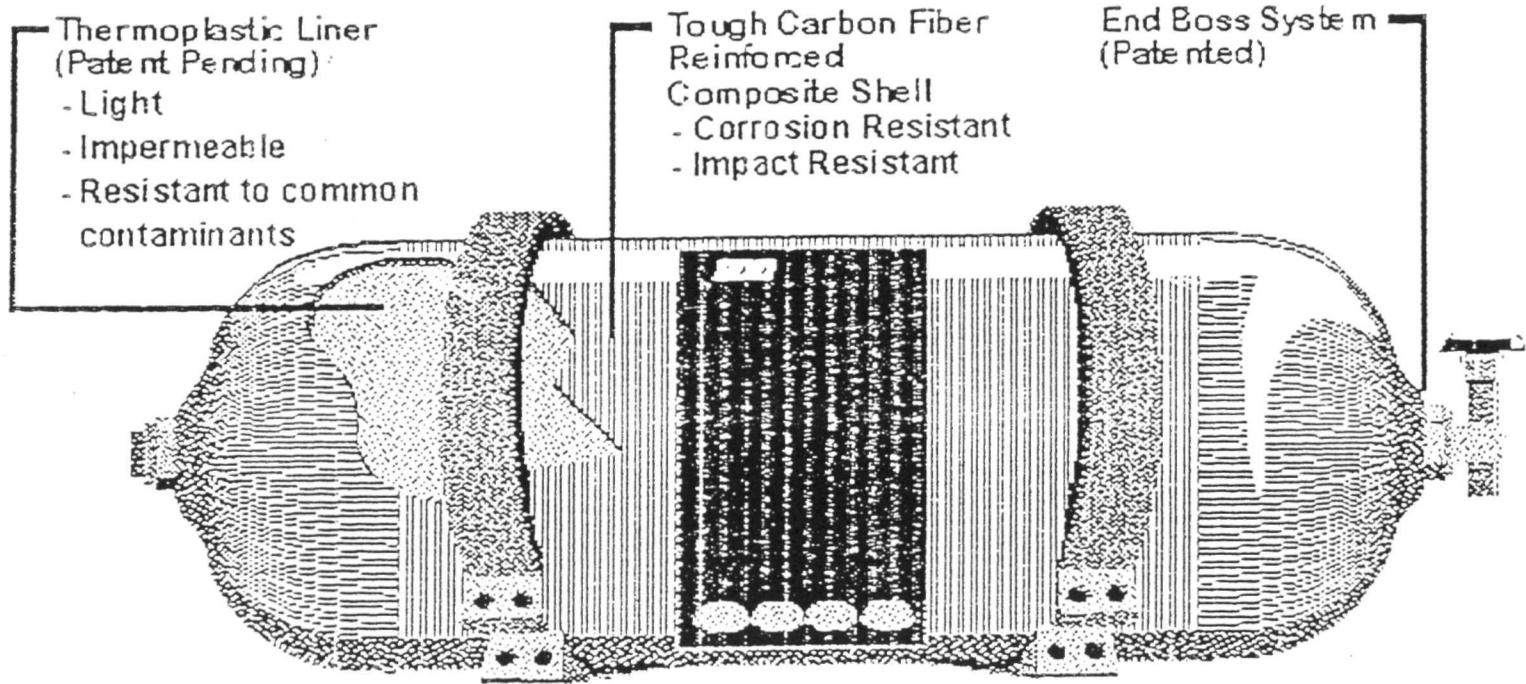
Emisiones de CO en gr/kg de combustible para $r = 7.26$







INSTALACION DE UN SISTEMA DE COMEUSTION (GAS L. P.)



BIBLIOGRAFIA Y FUENTES DE CONSULTA:

Artículos de revistas científicas:

Bain, Richrad L., Overend, Ralph P., Craig, Kevin R. BIOMASS-FIRED POWER GENERATION. National Renewable Energy Laboratory. Conference Paper: "Biomass Usage and Industrial Power". Mayo de 1996

Becker, Bernard; Thomas H. Schukenberg. A New Generation of Gas Turbines. Siemens Review. Fall 95 R & D Special

Buendía Domínguez, Eduardo H.; Monedero de la Vega, Arturo F. La cogeneración en las plantas industriales. Revista de la AMIME. Enero – febrero 1992. ISSN 0186-386X

Campbell. C.J. Oil Shock. FOSSIL FUELS, junio de 1966, p.p. 7 - 1

CONDUMEX. Los Sistemas Solares Fotovoltaicos. División Energías Alternas.

Davis, Ged R. Energy for Planet Earth
SCIENTIFIC AMERICAN, ENERGY FOR PLANET EARTH. Special issue. Septemeber 1990

Deborah L. Bleviss and Peter Walzer, Energy for Motor Vehicles
SCIENTIFIC AMERICAN, ENERGY FOR PLANET EARTH. Special issue. Septemeber 1990

Djong-Gie Oei,. Fuel cell engines for vehicles
Automotive Engineering, February 1997

Drenckhahn, Wolfgang; Vollmar, Horst-E., Fuel Cells For Mobile and Stationary Applications. Siemens Review. Octubre de 1995 Alemania 1995, p.p. 21, 22.

Fulkerson, William; Roddie R. Judkins; Manoj K. Sanghvi. Energy from Fossil Fuels. SCIENTIFIC AMERICAN, ENERGY FOR PLANET EARTH. Special issue. Septiembre de 1990

Häfele, Wolf. Energy from Nuclear Power. SCIENTIFIC AMERICAN, ENERGY FOR PLANET EARTH. Special issue. Septiembre de 1990.

Holmberg, John; Robert, Karl-Henrik; Eriksson, Karl-Henrik. Socio-Ecological Principles for a Sustainable Society

Kell Ohlenschlaeger y Birger T. Madsen.
Windstats Newsletter, autumm issue 1996. Vol. 9, No 4, pag. 4-6
Future potential for MW wind turbines
BTM Consult ApS
<http://home4.inet.tele.dk/btmcwind/MW-wtg.htm>

Leutwyler, Kristin. PLASTIC POWER, Scientific American Diciembre de 1996

Mackenzie, Debora. Energy Answers for North and South. New Scientist. Febrero 1991.

Mármora, L. Del Sur Explotado al Sur Marginado. Nueva Sociedad, Nº 122, Caracas, Nov. - Dic. 1992

Ohlenschlaeger, Kell & Birger T. Madsen.
Windstats Newsletter, autumn issue 1996. Vol. 9, No 4, pag. 4-6
Future potential for MW wind turbines
BTM Consult ApS
<http://home4.inet.tele.dk/btmcwind/MW-wtg.htm>

Schneider, Stephen H. The Greenhouse Effect: Science and Policy. Science, vol 243. febrero 1989.

Seinfeld, John H.. Urban Air Pollution: State of the Science. Science, vol 243. febrero 1989.

Solid Oxide Electrolyte Fuel Cells, SCIENTIFIC AMERICAN Explorations, Diciembre de 1996.
<http://www.sciam.com/explorations/122396explorationsbox3.html>

Weinberg, Carl J; Williams, H. Robert. Energy from the Sun
SCIENTIFIC AMERICAN, Energy for planet earth. Special issue. Septemeber 1990

Werner Harbauer, Modernos sistemas de accionamiento para automóviles eléctricos. Revista Siemens.
Julio/septiembre de 1994

Libros consultados:

Barrere M., Bizec, René-Francois LAS NUEVAS ENERGÍAS. España, 1986
Biblioteca de Divulgación Científica muy Interesante Ed. ORBIS

Balzhiser, Richard E.; Samuels, Michael R.; Eliassen, John D. Termodinámica Química Para Ingenieros.
España 1980 Prentice Hall

Black, William Z.; Hartley, James G. TERMODINAMICA. México 1989 CECSA

Cengel, Yunus A., Boles, Michael A. TERMODINAMICA. Tomos I y II. Segunda edición. México 1995.
McGraw-Hill

Enkerlin, Ernesto C.; Cano, Gerónimo; Garza, Raúl A.; Vogel Enrique. CIENCIA AMBIENTAL Y
DESARROLLO SOSTENIBLE. México 1997. International Thomson Editores

Henry, J. Glynn; Gary W. Heinke ENVIRONMENTAL SCIENCE AND ENGINEERING
Segunda edición. USA 1996 Ed. Prentice – Hall.

Keating, Eugene L. APPLIED COMBUSTION. USA 1993. Ed. Marcel Dekker, Inc.

Faires / Simmang. TERMODINAMICA. 6a edición. México 1990. UTEHA

Howell, John R.; Buckius, Richard O. Principios de termodinámica para ingenieros. México 1990 McGraw-
Hill

Huang, Francis F. Ingeniería TERMODINAMICA, fundamentos y aplicaciones. 2a edición. México 1994
CECSA

Manahan, S. E. "Environmental Chemistry". 6a edición. U.S.A. 1991, Editorial Lewis.

Manrique, José A. Energía Solar, Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas. México 1984. De. Harla

Pérez Cárdenas, Salvador. Fundamentos de Termodinámica. México 1990 LIMUSA

Perry, John H. MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO, tercera edición. México 1974. Ediorial UTEHA

Seinfeld, John H. Atmospheric Chemistry and Physics of AIR POLLUTION. USA 1986. John Wiley & Sons

Stern, Arthur C., Richard W. Boubel, D. Bruce Turner, Donald L. Fox. Fundamentals of Air Pollution. USA 1984. Academic Press

Wark, Kenneth; Warner, Cecil F. CONTAMINACIÓN DEL AIRE, Origen y Control México 1996. Ed. LIMUSA

Wark, Kenneth Jr. TERMODINAMICA. Quinta edición. México, 1990. McGraw-Hill.

Wedlich, Erhard Constitución y funcionamiento de las pilas de combustible. Enseñanza Programada, SIEMENS España, 1987. Ed. MARCOMBO, S.A.

Fuentes consultadas en el Web:

A Fact Sheet on the Health effects from Ionizing Radiation
Environmental Protection Agency. office of Radiation & Indoor Air. Radiation Protection Division,
septiembre 1997.

<http://www.epa.gov/radiation/ionize2.htm>

Alternative Fuel Vehicles, DOE
National Renewable Energy Laboratory, diciembre 1996.

<http://www.nrel.gov/documents/energy/altrfuel.html>

Biopower, renewable Electricity for local communities.
U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, diciembre 1996.

<http://www.eren.doe.gov/biopower/private.html>

BTM Consult ApS – MW WTG. junio 1997.

<http://home4.inet.tele.dk/btmcwind/MW-table3.htm>

Building Your Own Wind Machine-Sagrillo, junio 1997.

<http://www.igc.apc.org/awea/faq/brew/hp-brew1.html>

Calculating Environmental Benefits

BWEA (The Brithis Wind Energy Association), junio 1997.

<http://www.bwea.com/fscalcs.htm>

Can we rely on the wind?

BWEA (The British Wind Energy Association), junio 1997.

<http://www.bwea.com/fs4cap.htm>

Centro de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo Sostenible

Consulta Nacional Rumbo a la Cumbre Hemisférica Sobre Desarrollo Sostenible. Informe final de las reuniones nacionales. México, D.F. julio de 1996

<http://www.laneta.apc.org/rds/infofin.html#12>

Chrysler develops method for extracting hydrogen from gasoline, enero 1997.

<http://www.CNN.com/TECH/9701/06/fuel.cells.ap/index.html>

Climate Change Fact Sheet (25 y 28), Energy and greenhouse gas emissions, Global energy use during the industrial Age, septiembre 1996.

<http://www.uneo.ch/iucc/>

Effects of Acid rain on Forest

Environmental Protection Agency, septiembre 1997.

<http://www.epa.gov/acidrain/student/forests.htm>

Electric Vehicles Reduce Pollution, SCIENTIFIC AMERICAN, nov. 1996

<http://www.sciam.com/1196issue/1196sperlingbox1.html>

ENERGIA EOLICA, Instituto Costarricense de Electricidad, junio 1997.

http://www.ice.gov.cr/energia_html/fuentes/eolica.html

ENERGIA GEOTERMICA

Instituto Costarricense de Electricidad, junio 1997.

http://www.ice.gov.cr/energia_html/fuentes/geoter.html

Energy and greenhouse gas emissions

IUCC, octubre 1996.

<http://www.unep.ch/iucc/fs025.html>

Energy Efficiency in Industrial Technologies

National Renewable Energy Laboratory, diciembre 1996.

<http://www.nrel.gov/documents/energy/ee-indus.html>

Energy Storage. University of Oregon, noviembre 1996.

<http://zcbu.uoregon.edu/ph162/>

Environmental Benefits

Acid Rain Program

Environmental Protection Agency, septiembre 1997.

<http://www.epa.gov/acidrain/envben.html>

Fuel Cells: Advantages of the Fuel Cell Power Plant

Research in Progress, Advanced Power Systems, septiembre 1996.

http://www.metc.doe.gov/research/power/fc_advan.html

Fuel Cells, Molten Carbonate Fuel Cells (MCFCs)

Research in Progress, Advanced Power Systems, septiembre 1996.

http://www.metc.doe.gov/power/fc_mcfc.html

Fuel Cells, Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs)

Research in Progress, Advanced Power Systems, septiembre 1996.

http://www.metc.doe.gov/power/fc_sofc.html

Fuel Cell Systems

Research in Progress, Advanced Power Systems, septiembre 1996.

http://www.metc.doe.gov/research/power/fc_syste.html

Fuel Cell Types

Electro – Chem – Technic, noviembre 1996.

<http://www.i-way.co.uk/~ectech/FCTYPES.HTML>

Future potential for MW wind turbines

BTM Consult ApS, junio 1997.

<http://home4.inet.tele.dk/btmcwind/MW-wtg.htm>

Geothermal Electricity Production

U.S. Department of Energy, junio 1997.

<http://www.eren.doe.gov/geothermal/gep.html>

Hybrid Electric Vehicle Program, What is an HEV?, octubre 1996.

<http://www.hev.doe.gov/general/whatshev.html>

LNG Fact Sheet, Source: NGS, febrero 1997.

<http://www.naturalgas.org:80/LNGFACT.HTM>

M-C POWER-Developing the 2nd Generation FuelCell

Natural Gas-Fueled Advanced Power Systems, septiembre 1996.

<http://www.metc.doe.gov/projfact/power/fc/mcpwr.html>

Natural Gas Fueled Advanced Power Systems.

Fuel Cells Project. San Diego California, septiembre 1996.

<http://www.metc.doe.gov/projfact/ppower/fc/>

PEMEX

Documento: Pemex Magna Reformulada “GASOLINA PEMEX MAGNA^{MR} VALLE DE MEXICO”, octubre 1996.

<http://www.pemex.com/fpemhoy.htm>

Phosphoric Acid Fuel Cell Commercialization

Natural Gas-Fueled Advanced Power Systems, septiembre 1996.

<http://www.metc.doe.gov/projfact/power/fc/onsi.html>

Renewable Energy Annual. Office of Coal, Nuclear, Electric and Alternate Fuels, U.S. Department of Energy. Solar and Photovoltaic, Wind, Geothermal, diciembre 1996.

http://www.cia.doe.gov/cneaf/pubs_html/

Renewable Energy: Geothermal Energy

National Renewable Energy Laboratory, diciembre 1996.

<http://www.nrel.gov/documents/energy/re~geoth.html>

Renewable Energy: Photovoltaics

National Renewable Energy Laboratory, diciembre 1996.

<http://www.nrel.gov/documents/energy/re~pv.html>

Renewable Energy: Solar Thermal

National Renewable Energy Laboratory, diciembre 1996.

<http://www.nrel.gov/documents/energy/re.solar.html>

Solar and Photovoltaic: Technology Characterization, octubre 1996.

http://www.eis.doe.gov/cncaf/pubs_html/rea/chap11.html

Solar Energy: Conversion into Electricity. The Electronic Universe Project.

Oregon University, noviembre 1996.

<http://zebu.uoregon.edu/ph162>

Solid Oxide Electrolyte Fuel Cells

SCIENTIFIC AMERICAN, Home Page, febrero 1997.

<http://www.sciam.com/explorations/122396explorationsbox3.html>

Solid polymer and acid electrolyte fuel cell operation, febrero 1997.

<http://www.i-way.co.uk/~ectech/ACIDIFC.HTML>

Spent Nuclear Fuel and High-level Radioactive Waste.

Environmental Protection Agency, office of Radiation & Indoor Air, Radiation Protection Division, septiembre 1997.

http://www.epa.gov/radiation/radwaste/snf_hlw.htm

The different types of fuel cells, Electro - Chem - Technic. , febrero 1997.

<http://www.i-way.co.uk/~ectech/>

The Environmental Impact of Natural Gas, febrero 1997.

<http://www.naturalgas.org:80/ENVIRON2.HTM>

The fuel cells, How the Fuel Cell Works, febrero 1997.

<http://www.daimlerbenz.com/spotlite/necar>

The first new kind of car since the early twentieth century, febrero 1997.

<http://www.gmev.com/evs/ev1/ev1.htm>

The Power of the Wind

BWEA (The British Wind Energy Association), junio 1997.

<http://www.bwea.com/part-2.htm>

Understanding Climate Change: A beginner's Guide to the UN Framework Convention

Universidad de Oregon. Energy Storage, noviembre 1996.

<http://zebu.uoregon.edu/ph162/>

What is acid rain?

Environmental Protection Agency, septiembre 1997.

<http://www.epa.gov/acidrain/student/aciddef.html>

What is radiation?

Environmental Protection Agency, septiembre 1997.

<http://www.epa.gov/radiation/rrpage/rrpage2.html>

Why Wind Energy is Getting Cheaper

BWEA (The Brithis Wind Energy Association), junio 1997.

<http://www.bwea.com/fscost.htm>

Wind Energy in California, junio 1997.

<http://www.energy.ca.gov/energy/earthtext/wind.html>

Wind Siting, Larry Elliot, abril 1997.

<ftp://sunsite.unc.edu/pub/academic/enviro.../homepower-magazine/archives1/01pg16.txt>

OTROS

Berrueta Soriano Víctor Manuel. Instalaciones Solares Fotovoltaicas. Tesis, mayo de 1996. Universidad Panamericana Sede Guadalajara

CFE, Folleto informativo sobre la Central Termoelectrica MANZANILLO II
Gerencia de Generación y Transmisión

