



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”**



**“COMPORTAMIENTO TERMODINÁMICO DE UNA
TURBINA DE GAS USANDO ETANOL
COMO COMBUSTIBLE”**

T E S I N A

**PARA OBTENER EL DIPLOMA DE
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA TÉRMICA**

P R E S E N T A

ING. RODRIGO JARAMILLO MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESINA

DR. IGNACIO CARVAJAL MARISCAL

México, D.F.

Octubre 2011



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESINA

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 16:00 horas del día 16 del mes de Junio del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesina, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. para examinar la tesis titulada:

“COMPORTAMIENTO TERMODINÁMICO DE UNA TURBINA DE GAS USANDO ETANOL COMO COMBUSTIBLE”.

Presentada por el alumno:

JARAMILLO
Apellido paterno

MARTÍNEZ
Apellido materno

RODRIGO
Nombre(s)

Con registro:

B	0	9	2	2	7	3
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA TÉRMICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESINA**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesina

DR. IGNACIO CARVAJAL MARISCAL

Presidente

DRA. CLAUDIA DEL CARMÉN GUTIÉRREZ TORRES

Secretario

DR. JUAN GABRIEL BARBOSA SALDAÑA

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. JAIME ROBLES GARCIA





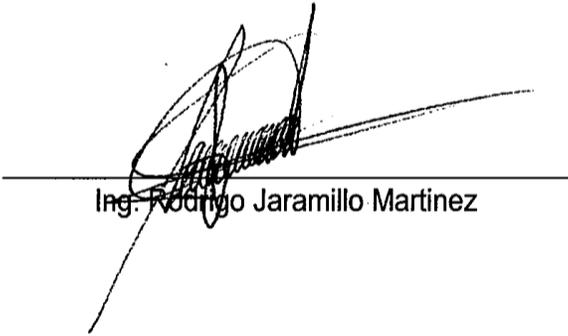
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 29 del mes de Septiembre del año 2011, el (la) que suscribe Ing. Rodrigo Jaramillo Martinez alumno(a) del Programa de Especialidad en Ingeniería Térmica con número de registro **B092273**, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Ignacio Carvajal Mariscal cede los derechos del trabajo intitulado: Comportamiento Termodinámico de una turbina de gas usando Etanol como Combustible al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: rjm1303@yahoo.com

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Ing. Rodrigo Jaramillo Martinez

INDICE

RESUMEN.	4
ABSTRACT.	5
RELACION DE FIGURAS Y TABLAS.	6
NOMENCLATURA.	8
INTRODUCCIÓN.	9
Capítulo 1: ANTECEDENTES.	10
1.1 Consumo de energía en el Mundo.	10
1.2 Biocombustibles.	13
1.3 Etanol.	20
Capítulo 2: PROCESO DE COMBUSTION DEL GAS NATURAL.	26
2.1 Turbina de Gas.	26
2.2 Cámara de Combustión.	33
2.3 Emisiones.	44
2.4 Cálculo de Combustión con Gas Natural.	52
2.5 Cálculo de Combustión con Etanol.	58
Capítulo 3: COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.	63
CONCLUSIONES.	71
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.	72
ANEXO A. <i>Consumo de combustible para Gas Natural</i>	74
ANEXO B. <i>Consumo de combustible para Etanol.</i>	77

RESUMEN.

En éste trabajo se calculan los requerimientos de combustible tanto de gas natural como de etanol para una turbina GE modelo 61B, evaluando la posibilidad del uso de etanol en este tipo de maquinaria. Para su mejor comprensión, se utilizó el gas natural como punto comparativo para este estudio, calculando los requerimientos de combustible y de aire a la entrada y salida de la cámara de combustión, obteniendo las diversas emisiones para ambos combustibles a diferentes temperaturas y a diversas relaciones de aire/combustible.

Se calculó el ciclo completo Joule-Brayton en forma ideal a la turbina para los 4 procesos principales que marca el ciclo, partiendo como base los datos de diseño señalados por el fabricante que vienen en su página de internet, de esta manera se contó con una base termodinámica sobre la cual trabajar. Enfocándonos, únicamente en la cámara de combustión de la turbina, se fijo la temperatura a la entrada de la cámara (T_2) y se vario la temperatura a la entrada de la turbina (T_3). Posteriormente, utilizando las temperaturas obtenidas en el cálculo del ciclo se consiguieron las relaciones estequiométricas de aire/combustible y las fracciones molares. Variando ahora la relación aire/combustible para obtener las emisiones a diferentes mezclas para ambos combustibles.

Se obtuvieron los requerimientos de combustible para gas natural y etanol, comprobando que el etanol, debido a su poder calorífico inferior, su cantidad de combustible son mayores para poder obtener la temperatura requerida. En cuanto emisiones, no se encontró una prueba fidedigna de que el etanol represente una fuente de emisión menor a la del gas natural, sin embargo, puede ser un buen sustituto debido a que se considera al gas natural como uno de los combustibles más limpios.

ABSTRACT.

In this work there are calculations for fuel requirements using natural gas and ethanol for a GE 61B gas turbine, evaluating the possibility of use ethanol in this kind of machinery. For better understanding, combustion analysis for natural gas was performance as a comparison point, calculating fuel and air requirements at the entrance and exit of the combustion chamber, obtaining the principal emissions for both, fuels at different temperatures and relationships air / fuel.

Ideally calculations to a complete Joule-Brayton cycle, for the 4 main processes that have the cycle, began using design data designated by the manufacturer from his website. In that way, count with a thermodynamic basis to use in the work. Focus on the combustion turbine, setting the temperature at the entrance of the combustion chamber (T2) and varying the temperature at turbine inlet (T3). Afterward, using the temperatures resulted by the calculations, stoichiometric air / fuel ratio and mole fractions were found. Finally, varying air / fuel ratio at diverse mixtures, we got emissions for both fuels.

We obtained the fuel requirements for natural gas and ethanol, note that ethanol, due to its lower calorific value, the amount of fuel is higher in order to obtain the required temperature. In terms of emissions, there was no convincing evidence that ethanol represents a minor emission source than natural gas, however, can be a good substitute because natural gas is considered as one of the cleanest fuels.

RELACION DE FIGURAS Y TABLAS.

Relación de Figuras

Figura 1.1 *Producción de Energía*

Figura 1.2 *Crecimiento de la Producción de Biocombustibles*

Figura 1.3 *Producción Mundial de Etanol*

Figura 2.1 *Componentes de una Turbina de gas*

Figura 2.2 *Ciclo Joule-Brayton*

Figura 2.3 *Comportamiento termodinámico de una turbina GE MS6001B (6B)*

Figura 2.4 *Distribución del aire en la cámara de combustión*

Figura 2.5 *Variación de la temperatura de la llama con la relación aire/combustible Φ*

Figura 2.6 *Relación aire/combustible representada en masa*

Figura 2.7 *Entalpías de la combustión a diferentes temperaturas*

Figura 2.8 *Formación de NO_x en función del tiempo y temperatura; $P = 1 \text{ MPa}$*

Figura 2.9 *Efectos en el tiempo de residencia en los NO_x*

Figura 2.10 *Emisión de contaminantes respecto al radio equivalente*

Figura 2.11 *Fracciones molares de las principales emisiones variando la relación aire/combustible para el gas natural*

Figura 2.12 *Fracciones molares de las principales emisiones variando la relación aire/combustible para el etanol*

Figura 3.1 *Consumo de combustible Etanol contra Gas natural*

Figura 3.2 *Excesos de aire para Etanol y Gas Natural*

Figura 3.3 *Comparación de la fracción molar del CO₂ para etanol y gas natural*

Figura 3.4 *Comparación de la fracción molar del H₂O para etanol y gas natural*

Figura 3.5 *Comparación de la fracción molar del O₂ para etanol y gas natural*

Figura 3.6 *Comparación de la fracción molar del N₂ para etanol y gas natural*

Relación de Tablas

Tabla 1.1 *Propiedades químicas del biodiesel*

Tabla 1.2 *Desarrollo histórico del metanol*

Tabla 1.3 *Síntesis del Metanol*

Tabla 1.4 *Propiedades de combustibles alternativos*

Tabla 1.5 *Propiedades Físicas y Químicas del Etanol*

Tabla 2.1 *Características de diversas turbinas de gas*

Tabla 2.2 *Turbina GE MS6001B (6B)*

Tabla 2.3 *Principales contaminantes emitidos por la turbina de gas*

Tabla 2.4 *Composición química típica del Gas Natural Mexicano*

Tabla 2.5 *Peso molecular, fracción masa y mol de los componentes de los gases de escape del gas natural*

Tabla 2.6 *Fracciones molares de las principales emisiones variando la relación aire/combustible para el gas natural.*

Tabla 2.7 *Peso molecular, fracción masa y mol de los componentes de los gases de escape del etanol*

Tabla 2.8 *Fracciones molares de las principales emisiones variando la relación aire/combustible para el etanol*

Tabla 3.1 *Consumo de Etanol por año para turbinas 61B*

NOMENCLATURA.

T	Temperatura [K]
s	Entropía específica[kJ/kg]
P	Presión [Pa]
h	entalpía [kJ/kg]
Q	Calor específico [kJ/kg]
W	Trabajo [kJ/kg]
η	Eficiencia [%]
Φ	Relación equivalente aire/combustible
AC	Relación Aire/combustible
m	masa [kg]
N	Número de Moles
M	Masa molar
B	Cantidad de combustible [kg]
Hu	Calor especifico del combustible [kJ/kg]
λ	Exceso de aire
x	Porcentaje de gases en el aire
X_{est}	Cantidad mínima de aire necesario
UHC	Hidrocarburos sin quemar

INTRODUCCIÓN.

Se ha observado un constante escalamiento en los combustibles fósiles, esto ha llevado a que se empiecen a buscar diversas fuentes de energía para satisfacer la constante demanda de energía en el mundo, esto representa un grave problema porque los recursos no renovables como el petróleo o el gas natural, tienden a ser cada vez más escasos y difíciles de obtener

El objetivo de este trabajo es el estudiar el comportamiento termodinámico de la turbina de GE modelo 61B utilizando etanol como combustible primario.

Debido a la creciente demanda de energía en el mundo se requiere buscar diferentes fuentes de energía renovables que puedan emplearse en máquinas ya existentes sin que represente un mayor cambio a la configuración que éstas posean, buscando principalmente un desarrollo sostenible.

En el primer capítulo se expondrá un análisis general de los combustibles fósiles más usados, así como del panorama general de los biocombustibles tales como metanol, biodiesel y el mismo etanol, además conoceremos en qué se diferencian de los combustibles fósiles.

En el segundo capítulo se hará una breve descripción de la turbina de gas, se elegirá un tipo de gas natural representativo de una región en el cual se incluirán sus propiedades naturales; tales como composición química y sus respectivos porcentajes, su calor específico, etc. De igual forma se establecerá una composición química para el etanol. Finalmente se obtendrán los requerimientos energéticos de ambos combustibles en una turbina de gas previamente seleccionada.

En el tercer capítulo, se hará un comparativo con el uso de ambos combustibles, en un mismo tipo de turbina y bajo similares condiciones, con el fin de obtener la factibilidad del uso de etanol en una turbina de gas y determinar algunas limitantes en su uso.

Capítulo 1: ANTECEDENTES.

En este capítulo se describen las principales propiedades de algunos de los combustibles fósiles así como de los biocombustibles más usados. Debido a la naturaleza finita (no renovable) de los combustibles fósiles se ha buscado el uso de fuentes alternas tales como el etanol, el cual, su uso en la industria durante años ha sido relegado a un segundo plano, como lubricante principalmente o como un método para lavar combustibles y no como una fuente de combustible en sí.

1.1 Consumo de energía en el Mundo.

El desarrollo sustentable ha sido definido como “el desarrollo de las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidad” según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), por esencial que pueda sonar, la energía es sólo un medio para un fin. El fin es la buena salud, mejorar el nivel de vida de la sociedad, una economía sostenible y un medio ambiente limpio. Ninguna forma de energía ya sea carbón, solar, nuclear, eólica o cualquier otra, es buena o mala en sí misma y cada una es valiosa en la medida en que ayuda a alcanzar este fin.

Gran parte de la oferta energética actual suministrada o en uso está limitada a los recursos provenientes de los combustibles fósiles, la cual se considera ambientalmente insostenible. En la actualidad no hay energía producida o convertida por la tecnología sin algún riesgo o sin producir algún desecho. En algún momento de la cadena de suministro de la energía, desde la extracción de los recursos hasta la prestación de los servicios de energía, se emiten contaminantes y muy a menudo con graves afectaciones a la salud y al medio ambiente. Las emisiones producto de los combustibles fósiles son el principal responsable de la contaminación del aire en las ciudades, la acidificación regional y los riesgos del cambio climático inducido. El uso de la energía nuclear ha creado una serie de preocupaciones tales como el almacenamiento o la eliminación de los residuos con alto nivel radioactivo y la proliferación de armas nucleares. Por otro lado, el uso de biomasa en algunos países ha contribuido a la desertificación y a la pérdida de la biodiversidad.

Lograr un desarrollo sustentable a escala mundial requerirá el uso racional de los recursos, tecnología, incentivos económicos y estratégicos y la planificación de políticas a nivel local y nacional. El carácter finito de los combustibles fósiles y una ausencia de sustitutos adecuados se ha convertido en una gran preocupación.

Los recursos naturales pueden clasificarse como renovables o no renovables; los renovables son aquellos que se respeta su índice de recuperación, en cambio, los no renovables son aquellos donde existe el riesgo

de que se agoten, ya que su renovación ocurre sólo por procesos geológicos, físicos y químicos que tienen lugar a través de cientos a miles millones de años.

Los combustibles fósiles son recursos que no pueden ser renovados y en la actualidad representan el 97% de la energía primaria que consume el mundo, de ellos, un 38% proviene del carbón, un 40% del petróleo y un 19% del gas natural. Con el consumo y la demanda actual, el petróleo debe durar alrededor de 45 años más; mientras que el carbón, 230 años según el informe Energy Revolution de la organización internacional Greenpeace.

Se espera que la demanda mundial de energía primaria aumente un 1.5% anual entre 2007 y 2030, y pase de más de 12 000 millones de toneladas de petróleo a 16 800 millones de toneladas, es decir, un incremento total de 40% en el periodo considerado. Los países asiáticos en vías de desarrollo serán los principales autores de este aumento, seguidos por los de Medio Oriente [6].

En Estados Unidos más de la mitad de la energía es no renovable, como se muestra en la **Figura 1.1**, los datos empiezan a partir del año 1949 hasta 2008. Y aunque se puede apreciar que existe una tendencia a producir energía a partir de fuentes alternativas, ya sea nuclear o de recursos renovables, todavía existe una marcada dependencia de los combustibles fósiles, se contempla que éstos seguirán siendo la principal fuente de energía primaria en el mundo y el principal factor es atribuido al sector del transporte.

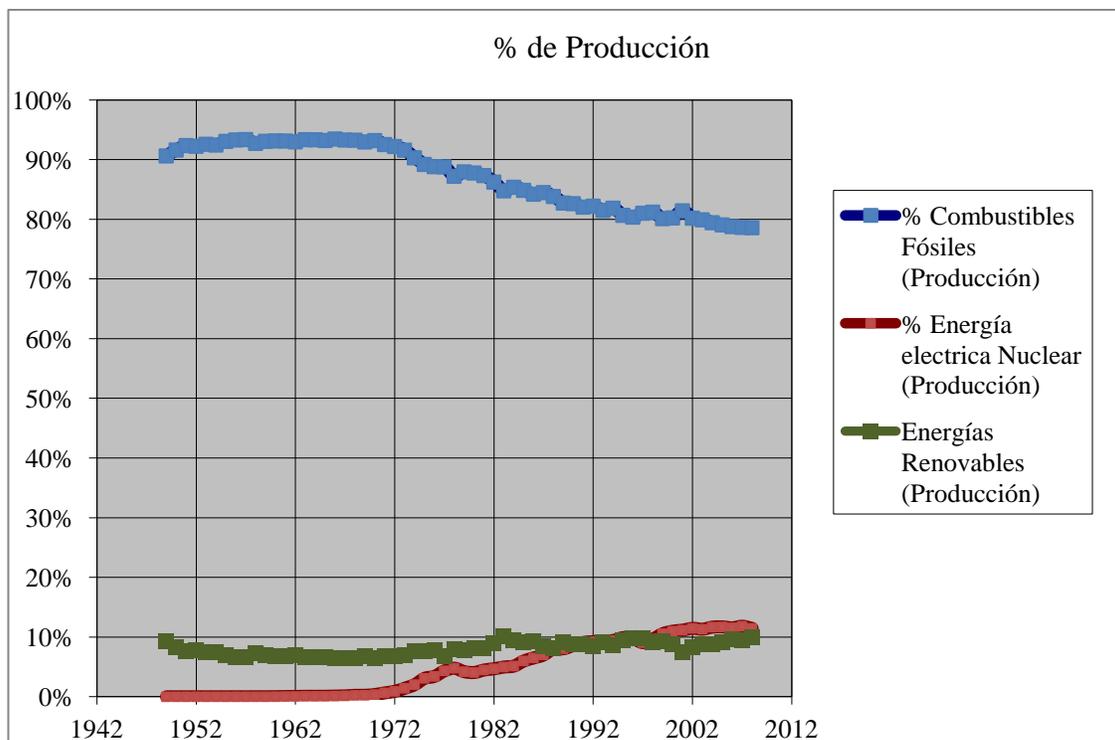


Figura 1.1 Producción de Energía * Agencia Internacional de la Energía (AIE).

El principal motor de la demanda de carbón y gas será el crecimiento de las necesidades energéticas para la generación de electricidad. Se estima que la demanda mundial de electricidad crezca un 2.5% anual hasta 2030. En términos generales, la capacidad de generación de electricidad adicional ascenderá a 4 800 giga vatios (GW) en 2030, casi el quintuplo de la capacidad existente en Estados Unidos, y el mayor consumo (aproximadamente el 28% del total) se producirá en China. El carbón seguirá constituyendo el combustible esencial para la producción eléctrica [6].

La utilización de las modernas tecnologías de energías renovables, energía eólica, solar, geotérmica, mareomotriz y bio-energía, registrará la mayor tasa de crecimiento hasta el 2030. La mayor parte de este crecimiento se producirá en la generación de electricidad, donde la proporción de las energías renovables pasará de 2.5% en 2007 al 8.6% en 2030 [6]

Las principales fuentes de energía que actualmente se utilizan son las siguiente [7]:

- **Carbón Mineral:** Se trata de un hidrocarburo sólido y es también un energético muy abundante a nivel Mundial. Su mayor desventaja radica en que su combustión libera una enorme cantidad de CO₂ y azufre (2.3 veces más que el petróleo). La mayor parte del carbón mineral tuvo su origen en el periodo geológico llamado carbonífero, en el cual se presume existía una vegetación exuberante, que fue la materia prima para la formación del carbón mineral. Este a su vez se divide en lignito y antracita, el lignito posee menor poder calorífico debido a la poca presión a la que fue sometido a lo largo de los años, en cambio, la antracita representa la forma más valiosa del carbón mineral la cual posee el doble del poder calorífico del lignito.
- **Yacimientos petroleros:** Tienen un origen similar al del carbón, sin embargo, los procesos involucrados son menos conocidos. El petróleo contiene al igual que el carbón, carbonos e hidrógenos en diferentes proporciones específicas, las cuales determinan si el combustible obtiene consistencia sólida (carbón) o fluida (petróleo). El petróleo contiene mayor cantidad de hidrógenos, por lo cual es más ligero y contiene un mayor poder calorífico que el carbón en proporción de 1:1.5. Debido a las deformaciones de la corteza terrestre, se forman “trampas de petróleo”, en las cuales tiende a acumularse el petróleo formando yacimientos. Los productos derivados del petróleo se han convertido en una parte imprescindible de la vida moderna, ya que puede ser transformados en los más diversos productos, desde medicamentos y agroquímicos hasta plásticos, es por ello que se debe de cuidar las reservas de hidrocarburos haciendo más eficiente su uso y buscando alternativas que provengan de fuentes renovables.

- **Gas Natural:** Es el más limpio de todos los energéticos naturales, debido a que emite aproximadamente 30% menos de gases contaminantes. El gas natural es un compuesto con base en hidrocarburos su composición química depende de su origen, ya que aquel que proviene de yacimientos de carbón posee un alto porcentaje de metano, que es inodoro, de combustión limpia y un alto poder calorífico. El gas natural caracterizado como metano CH_4 tiene un poder calorífico superior de 55,528 kJ/kg

En términos ambientales hasta 2030 se espera un aumento rápido y continuo de las emisiones (CO_2) relacionadas con la energía, como resultado del incremento general de la demanda de energía fósil. Después de pasar de 20.5 giga toneladas (Gt) en 1990 a 28.8 Gt en 2007, se calcula que las emisiones de CO_2 alcanzarán 34.5 Gt en 2020 y 40.2 Gt en 2030 lo que implica un aumento medio del 1.52% anual durante todo el periodo [5].

En la actualidad se trata de implementar medidas para lograr la reducción de emisiones por CO_2 , como el que cada país tenga que pagar por cada tonelada de CO_2 que libere a la atmósfera. Esto hará más caro el uso de energéticos tradicionales y provocará un giro hacia los alternativos, lo que podría aumentar la sustentabilidad de las fuentes de energía. “El mundo sigue peligrosamente enganchado al petróleo y los combustibles fósiles”, dijo Kofi Annan, ex secretario General de las Naciones Unidas, en un discurso pronunciado en los Emiratos Árabes Unidos en febrero del 2007. Añadió que “debemos mirar al futuro, más allá de la vida finita de los combustibles fósiles, y promover otras fuentes de energía no contaminantes y renovables, como la solar, la eólica y los biocombustibles. La creciente demanda de petróleo está haciendo reflexionar al mundo como nunca antes. Los elevados precios actuales del petróleo refuerzan el apoyo mutuo entre los argumentos económico y ambiental” [19].

1.2 Biocombustibles.

Las energías renovables derivadas de fuentes solares, viento o biomasa poseen un gran potencial para desarrollarse y cumplir con las necesidades de energía futura. Combustibles como el etanol, biodiesel y metanol son clasificados como biocombustibles porque pueden ser producidos a través de la actividad biológica de los organismos.

El origen de todos los combustibles y compuestos de los biocombustibles es en última instancia el sol, la energía solar es capturada y almacenada en los compuestos orgánicos mediante el proceso de la fotosíntesis. Algunos biocarburantes como los aceites producidos por plantas y algas, son productos directos de la fotosíntesis, estos aceites se pueden usar directamente como combustibles. Otros

biocombustibles como el etanol y metanol son derivados de una base orgánica producto de la fermentación de algunos microorganismos en condiciones anaeróbicas.

Los Biocombustibles pueden definirse como cualquier combustible derivado de biomasa. Esto incluye algunos combustibles sólidos como madera o carbón, combustibles líquidos como etanol o biodiesel y combustibles gaseosos como el metano. Hay muchas formas de materias primas para la producción de biocombustibles. El estiércol animal y los residuos sólidos se han utilizado para la generación de metano con fines energéticos.

Hay dos biocombustibles primarios utilizados para aplicaciones en el mundo, el más usado es el etanol, fabricado a partir de azúcar o de almidón; y el biodiesel, por lo general producto de grasas animales o de aceites vegetales. Ambos combustibles han experimentado un fuerte incremento en su producción, en parte influenciada por el aumento en los precios del petróleo, los cuales han forzado la utilización de fuentes alternativas.

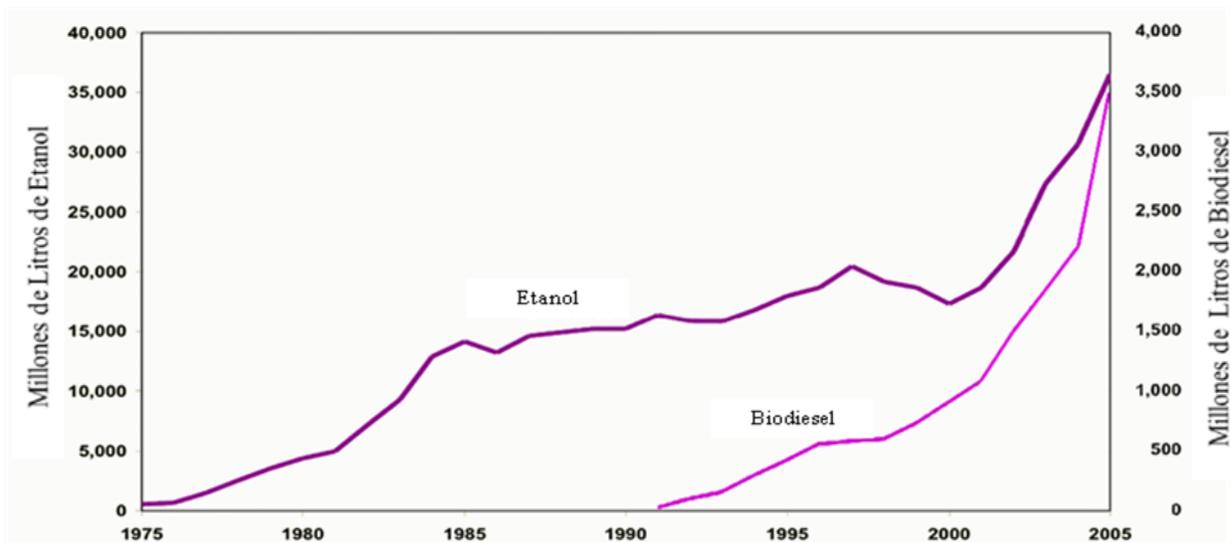


Figura 1.2 Crecimiento de la Producción de Biocombustibles [3].

El biodiesel es un éster producto de la reacción química vegetal o grasa animal en conjunto con alcohol, por lo general metanol. Como su nombre indica, tiene propiedades similares al combustible diesel, excepto que está hecho de recursos renovables. Es totalmente soluble en diesel fósil, a la mayoría de las temperaturas de operación, además se puede utilizar a diferentes porcentajes de mezclado esto es B2, B5 o biodiesel puro B100.

Esencialmente ninguna modificación de los motores es requerido, manteniendo la potencia que proporciona el diesel.

El biodiesel contiene oxígeno en su composición química, por lo tanto tiene alrededor de un 4.5% menos contenido energético si lo comparamos con el diesel procedente del petróleo bajo una misma base volumétrica, por lo cual la cantidad volumétrica es mayor para el biodiesel que para el diesel de petróleo. Es fácilmente biodegradable y no es tóxico para el medio ambiente. Los monóxidos de carbono e hidrocarburos, producto de las emisiones de escape del motor se reducen cuando este se utiliza. Los beneficios de las emisiones son directamente proporcionales a la cantidad de biodiesel en el combustible, por ejemplo una mezcla B10 proporciona el doble de beneficio en emisiones en comparación con una mezcla B5. Las emisiones de gases de efecto invernadero son mucho más bajas para el biodiesel en comparación con el diesel fósil. A baja temperatura las características del biodiesel son por lo general no tan buenas como la mayoría de los combustibles fósiles por lo que se debe tener cuidado al usarlo en climas más fríos. [3]

Sebo animal y aceites vegetales son materia prima apropiada para su elaboración. En Latinoamérica y el Caribe hay tres aceites vegetales primarios estos son; aceite de soja, aceite de palma y aceite de girasol. Existen otras fuentes menores para su fabricación en tales como son; aceites de oliva y de ricino, pero los volúmenes son en la actualidad demasiado pequeños para ser de interés comercial. La elección de la fuente se encuentra más ligada a las condiciones agrícolas locales que al costo de producirlo. [3]

Algunas notables características del biodiesel son:

- Es un combustible que no daña el medioambiente por ser de origen vegetal en su estado 100% puro. Es totalmente biodegradable.
- El biodiesel y sus diferentes mezclas, reducen de manera significativa las emisiones de escape, incluyendo monóxido de carbono, hidrocarburos y partículas. Además, el biodiesel puro no contiene azufre por lo que las emisiones de SO_x son eliminadas evitando con esto la corrosión en las máquinas donde se usa.
- Produce menos gases de efecto invernadero comparado con el diesel fósil.
- El índice de cetanos del biodiesel está en el rango de 50 a 65 y depende de la materia prima. El diesel fósil típicamente posee un índice de cetanos en un rango de 40 a 55 y depende del proceso de refinación del petróleo. El índice de cetano es similar al índice de octanos, es decir, mide la calidad de ignición de un diesel (el octano mide la calidad de ignición de la gasolina). Es equivalente al porcentaje por volumen del cetano en la mezcla con heptametilnonano,

Típicamente los motores se diseñan para utilizar índices de cetano de entre 40 y 55, debajo de 38 se incrementa rápidamente el retardo de la ignición. En gasolinas, el número de octano de las parafinas disminuyen a medida que se incrementa la longitud de la cadena, mientras que en el diesel, el índice de cetano se incrementa a medida que aumenta la longitud de la cadena [15].

Las propiedades químicas del biodiesel son muy similares a las del diesel convencional, éstas son

Tabla 1.1 Propiedades químicas del biodiesel

Gravedad específica	0.88
Viscosidad a 20°C	7.5
Poder calorífico (kJ por litro)	33,300

Una de las principales desventajas del biodiesel es que con la tecnología actual, el costo de producción del biodiesel es mayor comparado con el etanol. Así mismo, su costo de producción es mayor si se compara contra el diesel fósil, el cual posee un costo de producción similar al de la gasolina.

Otro importante biocombustible producido en el mundo es el Metanol (CH_3OH), el cual es uno de los mayores productos químicos en volumen producidos en el mundo. La capacidad de producción mundial de metanol ha crecido de 15.9 millones de toneladas en 1983 hasta 22.1 millones de toneladas en 1991. Posee un crecimiento de alrededor del 11% por año durante 1990-1995. [8]

La fundamental razón para que los principales consumidores de petróleo en el mundo, como Estados Unidos, adopten la producción de metanol de fuentes diferentes al petróleo, esto es con base en el carbón o la biomasa, es para reducir las importaciones del mismo, esto también es impulsado por la crisis mundial de energéticos que el mundo afronto en épocas recientes.

La **tabla 1.2** resume la evolución histórica de los eventos relacionados con el metanol y sus tecnologías. El metanol fue producido comercialmente por la destilación destructiva de la madera en 1830. Este proceso prevaleció durante casi un siglo hasta la primera planta de metanol sintético introducido por Badische Anilin-und Soda-Fabrik (BASF) en 1923. DuPont introdujo la planta de metanol sintético en los Estados Unidos en 1927. A finales de 1940, el gas natural es introducido como medio para producir metanol. ICI anunció un proceso a baja presión para producirlo utilizando un catalizador basándose en el cobre. Este ópera entre 5 y 10 MPa frente a los 35 MPa en los procesos anteriores. El embargo petrolero suscitado en 1973 aumentó el interés del metanol como combustible alternativo. En 1989 Estados Unidos propuso normas de aire limpio que exigen el uso de combustibles menos contaminantes.

Tabla 1.2 Desarrollo histórico del metanol [8]

Año	Evento
1830	Primer proceso de producción de metanol comercial por destilación destructiva de la madera
1905	Metanol sintético sugerido por el químico francés Paul Sabatier
1923	Primera planta de metanol sintético comercializada por BASF
1927	Proceso de metanol sintético introducido a Estados Unidos
Finales de 1940	Conversión del gas natural como fuente de producción de metanol
1966	Metanol producido a baja presión anunciado por ICI
1973	Embargo petrolero, reevaluación de los combustibles alternativos.
Década de los 70s	Metanol para procesar gasolina introducida por Mobil
1989	Regulaciones ambientales propuestas por Estados Unidos
1990	Aprobación a las regulaciones ambientales

La mezcla de metanol mayormente utilizada en la actualidad es la denominada M-85. En un futuro se tiene proyectado la utilización de un metanol más limpio o M-100. El metanol también se puede obtener a partir de un éter, MTBE (éter metil tert-butílico) que está mezclado con gasolina para reforzar el octanaje y crear gasolina oxigenada.

El metanol, es metano con una molécula de hidrógeno reemplazada por un radical hidroxilo (OH), el cual, puede ser producido a partir de una variedad de fuentes como el gas natural, carbón, biomasa y petróleo.

El metanol se sintetiza industrialmente a través de “syngas” (gas sintético). Algunos otros procesos incluyen la síntesis en 2 etapas, esto es utilizando syngas nuevamente como fuente y produciendo metilo en un paso intermedio, este proceso no es tan comercial, otro medio de obtenerlo es por medio de la oxidación directa del metano sobre un catalizador heterogéneo y por último a través de bio-procesos.

Tabla 1.3 Síntesis del Metanol [8].

Fuente	Proceso y reacciones	Catalizador
Syngas	Síntesis del metanol $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH}$ $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	$\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$ $\text{Cu/ZnO/Cr}_2\text{O}_3$ o Zn/Cr
Syngas	Proceso de dos etapas $\text{CH}_3\text{OH} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{HCOOCH}_3$ Que produce $\text{HCOOCH}_3 + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{CH}_3\text{OH}$	Metóxido de potasio, Cu cromita
Metano	Oxidación directa $\text{CH}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \text{ (ó } \text{N}_2\text{O)} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH}$	Óxido de metales (por ejemplo, MoO_3)
Metano	Bio-proceso	Enzimas (por ejemplo, citocromo P450), metanotrofos

Por otro lado, a lo largo de la historia el uso y producción de Etanol no es nuevo ni desconocido para la humanidad, Nicholas Otto lo uso en su máquina de combustión interna inventada en 1897, ha sido utilizado en Norte América desde comienzos de 1900. En el año 1908, Henry Ford diseñó su automóvil modelo T para ser usado con 100% Etanol. En años posteriores, hacia 1925, se empezó a emplear en Brasil una mezcla entre etanol y gasolina, esta misma también se utilizó en partes de Estados Unidos antes de la segunda guerra mundial.

Sin embargo, el etanol no tuvo su impacto en el mercado hasta los años 70's, debido a las dos crisis petroleras ocurridas en 1973 y 1979. Hacia el año de 1974, en respuesta a la crisis petrolera de 1973, el gobierno Brasileño lanzo su programa PRALCOOL, el cual tenía como objetivo el incrementar y difundir el uso del alcohol como combustible. En 1979, el congreso de los Estados Unidos estableció un programa federal basándose en el etanol, para estimular la economía rural y reducir la dependencia de los hidrocarburos. La producción y uso del etanol como combustible en Brasil, Estados Unidos y otros países alrededor del mundo se ha incrementado continuamente desde entonces.

En los años 80's, el etanol ha sido el mayor actor en el mercado de energía renovable como un oxigenante en los compuestos que se utilizan en las gasolinas. Por lo cual, su producción no es un área desconocida.

El etanol puede ser formado a partir de 3 principales fuentes, derivados del petróleo, azúcares y almidones, por otro lado, el etanol sintético puede ser producido a partir de aceites y gas natural a través de la hidratación del etileno.



Muchas compañías como Sasol, SADAF, British Petroleum y Equistar, producen etanol sintético con capacidades de 100 a 400 mil toneladas / año. Sin embargo, la proporción de la producción mundial del etanol sintético en el mundo bajó en un 7% en 1990 y en un 4% en 2006, producto del aumento de los precios del petróleo, el cual perjudica la rentabilidad del etanol sintético en comparación con el método producto de la fermentación.

La directa dependencia con el petróleo para producir etanol sintético hace que este tipo de etanol no pertenezca a la familia de los biocombustibles, este tipo de etanol es más bien conocido como Etanol fósil. Únicamente el etanol producido a partir de medios biológicos puede ser considerado biocombustible. Una de las características más importantes del bioetanol es que es un recurso renovable, lo que disminuye la dependencia del petróleo así como ser energéticamente eficiente, porque produce un tercio más de energía que la que se requiere para su elaboración y transporte. Además, tiene altas ventajas comparativas con los combustibles fósiles porque produce menos emisiones de contaminantes. Según el departamento de Energía de Estados Unidos el etanol produce menos monóxido de carbono e hidrocarburos que la gasolina común y corriente, su uso como combustible para automóviles reduce la producción de gases de invernadero en un 85%, por lo que es el principal candidato para reemplazar energías fósiles.

El bio-etanol contiene la misma composición química que el alcohol “desnaturalizado”, esto es, se le agregan sustancias para evitar que sea consumido por humanos. Similar al alcohol, se produce de la fermentación de algunos almidones o azúcares. El etanol también puede hacerse a partir de materiales con contenidos de celulosa, como la hierba, madera, residuos de cosechas, o periódicos. Sin embargo, este proceso es técnicamente más difícil debido a que estos materiales se deben romper en azúcares.

Una tabla comparativa entre los biocombustibles antes expuestos es mostrada en la **tabla 1.4**, se podrá apreciar algunas propiedades del etanol para diferentes mezclas, del metanol y del biodiesel.

Tabla 1.4 Propiedades de combustibles alternativos [16]

Combustible	Número de Cetanos¹⁾	Octanos²⁾	Densidad (kg/m³)	LHV (kJ/kg)
100% Etanol	8	109	816.94	26730
E85, 85% Etanol		105	800.92	29880
10% Etanol/gasolina		96.5	752.87	41840
10% Etanol/diesel	45		865.00	40680
100% Metanol	5	109	832.96	19520
B100, 100% Biodiesel	54			36730
B20, 20% Biodiesel, 80% petrodiesel	46			42070

Notas:

- 1. Cetanos es una medida de la calidad de la combustión o retrasar la ignición del combustible diesel durante el encendido por compresión*
- 2. Octanos es una medida de la resistencia a la detonación de los combustibles o de encendido*
- 3. LHV - cantidad neta de calor producido por la combustión de una cantidad unitaria de un combustible*

1.3 Etanol.

La producción mundial del etanol en 2006 fue de 49.8 GL (giga litros) o 39 megatoneladas, donde el 77% de la producción fue usada como combustible, 8% como partes de bebidas y el 15% diversas aplicaciones industriales. Desde 1975, el etanol para beber no ha experimentado un mayor crecimiento, sin embargo, el etanol para producción de combustible ha experimentado un fuerte incremento en su demanda de 1GL en 1975 a más de 38GL en 2006. [1]

Actualmente, existe una fuerte competencia entre Brasil y Estados Unidos para ser el mayor productor de etanol en el mundo. Hasta el momento, Brasil ha tomado el liderato como mayor productor. En el 2006, la

producción de etanol de Brasil y los Estados Unidos se espera que aumente un 102% y 93%, respectivamente. Sin embargo, en la producción total del resto del mundo se espera un aumento del 585%, esto quiere decir un aumento de alrededor de 100GL. Las principales razones de este fuerte incremento en la producción de etanol y la demanda en el futuro podrían ser [1]:

- Posible aumento de los precios del petróleo.
- Una mayor demanda de combustibles líquidos en el futuro.
- Disminución de la oferta de crudo en el futuro.
- Legislaciones ambientales en los diferentes países para fomentar la utilización de biocombustibles.
- La producción de materiales bio-plásticos a partir de etanol.

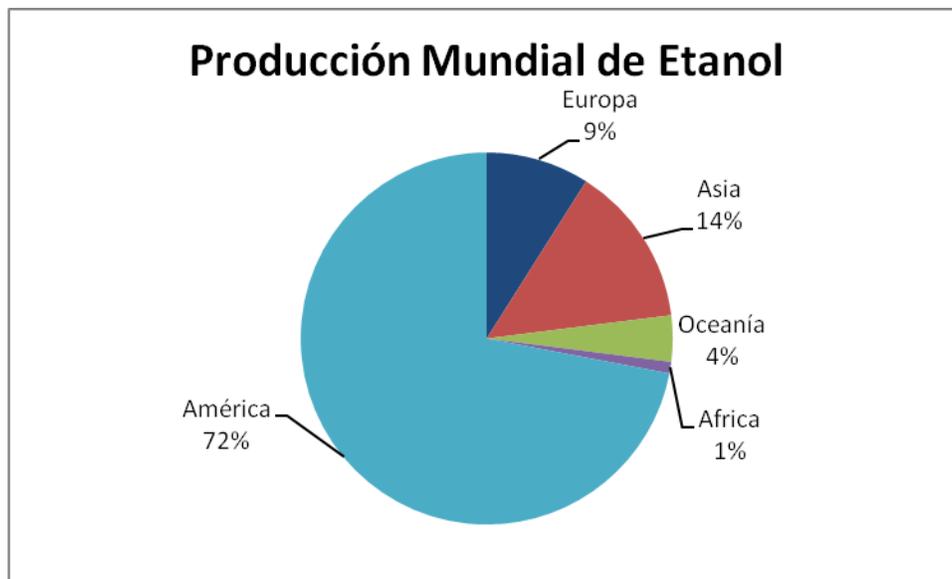


Figura 1.3 Producción Mundial de Etanol [1]

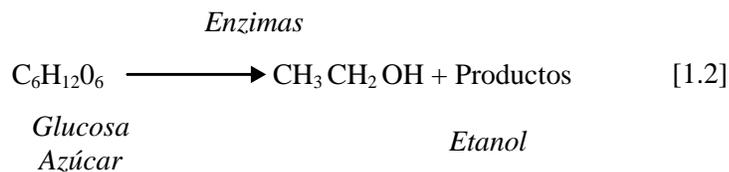
La elaboración mundial de Etanol está dividida entre los que proceden de la caña de azúcar y los procedentes del almidón como materias primas. La elección en la forma de producirlo depende del clima local así como también de ciertas condiciones agronómicas. En América Latina y el Caribe, la producción de etanol usando caña de azúcar es el método más comúnmente utilizado en la región. La producción de

etanol usando almidones requiere procesos adicionales a diferencia de la que procede de la caña de azúcar, es necesario adicionar enzimas para fermentar el azúcar que resulta del almidón.

Como se ha mencionado, el etanol se puede formar a partir de diversas fuentes, están las fuentes fósiles o a partir de fuentes biológicas, por lo cual también se le denomina como bio-etanol y aunque comparten las mismas propiedades químicas (ambos son $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) y físicas (ambos son alcoholes y se evaporan rápidamente en el medio), la forma de producirlo varía ampliamente.

Existen varias fuentes alternativas para la creación de etanol, están pueden ser a partir de granos, de melaza, jugo de caña de azúcar, frutas, excedentes de vino, suero de leche, y algunas otras fuentes similares, que contienen azúcares simples y sus polímeros.

El bio-etanol se forma a partir de la fermentación de carbohidratos (o hidratos de carbono) – azúcares y almidones – catalizada por enzimas (levadura). Un tipo de enzimas, convierte los carbohidratos en glucosa y luego en etanol; otro tipo produce vinagre (ácido acético) y etanol como intermediario.



La fuente de carbohidratos empleada para la fermentación depende de su disponibilidad y de los fines del alcohol. En los Estados Unidos, los carbohidratos se obtienen principalmente del maíz y de las melazas (residuo de la refinación del azúcar), sin embargo, pueden emplearse también papas, arroz, centeno o frutas (uvas, zarzamoras, etc).

La fermentación de cualquiera de estas frutas, vegetales o granos cesa cuando el contenido alcohólico alcanza 14 – 16%. Si se desea mayor concentración del alcohol, la mezcla se destila. El destilado, que es un azeótropo de 95% etanol y 5% agua, puede usarse para fortalecer la mezcla de la fermentación o puede diluirse con agua al grado deseado.

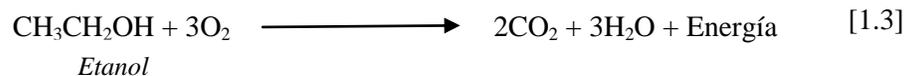
Un azeótropo (o mezcla azeotrópica) es una mezcla líquida de dos o más componentes que posee un único punto de ebullición constante fijo, y que al pasar al estado vapor (gaseoso) se comporta como un compuesto puro, o sea como si fuese un solo componente. Un azeótropo, puede hervir a una temperatura superior, intermedia o inferior a la de los constituyentes de la mezcla, permaneciendo el líquido con la

misma composición inicial, al igual que el vapor, por lo que no es posible separarlos por destilación simple.

Un ejemplo es la mezcla de etanol y agua, que forma un azeótropo para una concentración del 95% en peso de alcohol, que hierve a una temperatura de 78.2 °C. Con una destilación simple se obtiene un alcohol con esta concentración, pero para conseguir un compuesto más puro se necesita utilizar recursos especiales como una destilación azeotrópica.

Ya que las bebidas alcohólicas tienen impuestos en casi todos los países del mundo, la mayor parte del etanol vendido para fines industriales y de laboratorio, se desnaturaliza, es decir, se les adicionan pequeñas cantidades de impurezas tóxicas, de forma que no pueda usarse fuera del laboratorio o la fábrica para preparar bebidas en forma ilegal.

El etanol (C₂H₅OH) es un compuesto químico inflamable, claro y sin color, forma parte de la familia de los alcoholes, posee un alto grado de octanaje y altos contenidos de oxígeno (el cual no solo reduce las emisiones sino también el aumento de consumo de combustible) y cuando es producido de biomasa usando tecnologías modernas da como resultado una menor cantidad de emisiones en los gases de efecto invernadero, a diferencia de los producidos por las gasolinas procedentes del petróleo. La combustión se efectúa de la siguiente forma:



De acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental (EPA) se ha confirmado que el etanol hecho de caña de azúcar es un combustible renovable de bajo carbono que puede contribuir significativamente a la reducción de gases de efecto invernadero (GEI), el cual lo ha declarado como un biocombustible avanzado que reduce las emisiones de GEI en más del 50%, estos mismos resultados fueron validadas también comprobadas por “Dynergy facility”, las cuales validan la aplicabilidad y rendimiento de los biocombustible en turbinas de potencia, las pruebas arrojaron una reducción en las emisiones de NOx comparadas con otros combustibles procedentes del petróleo. [20]

Tabla 1.5 Propiedades Físicas y Químicas del Etanol [17]

Nombre Comercial:	Alcohol etílico, Alcohol anhidro.
Nombre Químico:	Etil Alcohol, Etanol anhidro, metil carbinol
Formula Química:	CH ₃ CH ₂ OH
Peso Molecular:	46.1
Composición	
*Carbon	52.2 % [18]
*Hidrógeno	13.1 % [18]
*Oxígeno	34.7% [18]
Poder calorífico	
*Inferior (kJ/kg)	26946.71 [18]
*Superior (kJ/kg)	29842.58 [18]
Apariencia:	Líquido claro y volátil
Olor:	olor característico, alcohólico
Gravedad específica ,	20°C: 0.78 g/cm ³
Punto de Ebullición, °C a 760 mmHg:	78.3°
Densidad relativa de vapor :	1.6 (Aire = 1)
Solubilidad en agua :	miscible en agua
pH a 10 g/l H ₂ O (20°C):	7
Flash point:	13°C anhidro (17°C, hidratado al 96%)
Temperatura de autoignición:	422 °C
Límite inferior de inflamabilidad:	3.3 (% vol. en aire)
Límite superior de inflamabilidad:	19 (% vol. en aire)
Presión de vapor, a 20°C:	43 mmHg
Punto de Fusión:	-112°C
Densidad relativa de las mezclas vapor/aire:	1.03 (aire = 1, a 20°C)
Calor específico, J/g °C :	2.42 a 20° C

Por lo tanto, la población mundial sigue creciendo, lo que representara un aumento en la demanda de energéticos, en su gran mayoría son producidos a base de combustibles fósiles, lo que conlleva a buscar mejorar la eficacia en su uso y a racionalizarlos para poder pretender un desarrollo sostenible en un futuro.

El mundo poco a poco se ha estado dando cuenta de la importancia de buscar fuentes de energía alternativa. En los últimos años han impulsado con mayor fuerza el uso de Biocombustibles como etanol, metanol o biodiesel, los cuales poseen como su mayor ventaja el hecho de que son renovables y a la vez emiten menor cantidad de contaminación al medio ambiente a diferencia de algunos combustibles pesados o gasolinas. Aunque estos combustible aún se encuentran en fase de desarrollo y la humanidad no ha adoptado plenamente su producción por lo que en si es una limitante.

El etanol no ha estado al margen del incremento en la producción, próximamente podría ser un fuerte candidato en la generación de energía por medio de turbina de gas. La cual como veremos en capítulos posteriores es uno de los principales medios de generación de electricidad.

Es factible la utilización y producción de etanol debido a que es energéticamente eficiente, ósea que se obtienen mayor energía que la que se requiere para producirlo.

Capítulo 2: PROCESO DE COMBUSTION DEL GAS NATURAL.

En este capítulo se describirá, de manera general, el funcionamiento de una turbina de gas, con sus principales componentes, esto con el fin de establecer los parámetros termodinámicos entre los cuales el gas natural y etanol deben funcionar. Así mismo, se incluye tablas de emisiones de ambos combustibles a fin de comparar ambos resultados. En el final de este capítulo se calculan los requerimientos energéticos usando ambos combustibles a la entrada de la turbina de gas, fijando la salida del compresor.

2.1 Turbina de Gas.

Las turbinas de gas es el alma de la planta generadora de energía tanto para el ciclo simple como para el ciclo combinado. En los últimos 40 años su uso ha aumentado con diversas aplicaciones en plantas para uso utilitario, en la industria petroquímica, en la de textiles y muchas otras y diversas aplicaciones alrededor del mundo, llegando inclusive a ser incluida dentro de la industria de aviación.

Las turbinas o turbomaquinaria sirven para transformar la energía potencial o cinética de un fluido generalmente aire, en energía mecánica, a través de un eje o flecha; o por el contrario, para transformar la energía mecánica en energía potencial. En las turbomáquinas se utiliza como medio de trabajo un gas o un vapor, dependiendo del sentido del transporte de la energía (del gas a la flecha o de ésta al gas), denominándose entonces turbina o turbocompresor. [10]

La turbina de gas se compone fundamentalmente de (**Figura 2.1**)

- **Compresor (o turbocompresor);** que toma el aire de la atmósfera, lo comprime y lo entrega al proceso de combustión. Por lo tanto se consume energía para el proceso de compresión.
- **Cámara de combustión;** donde tiene lugar la combustión de un combustible (gas o líquido). El propósito de esa etapa es el de aumentar la temperatura del aire comprimido hasta un valor conveniente.
- **Turbina de gas;** que expande la mezcla de aire y gases de combustión, y de esta manera transforma la energía térmica contenida en ellos en energía mecánica.

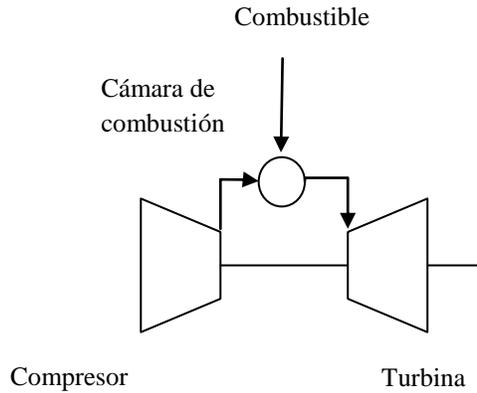


Figura 2.1 Componentes de una Turbina de gas

La eficiencia de una turbina de gas está muy ligada con la relación de presión de un compresor. El reto es obtener una relación de presiones lo suficientemente alta aumentando la eficiencia del compresor, mayor presión con un menor requerimiento de energía. Este problema no fue solucionado hasta que se introdujo la aerodinámica para resolver este problema.

El desarrollo de las turbinas de gas fue a la par, tanto con el desarrollo de la aerodinámica como de la metalurgia, con el resultado que ahora las turbinas de gas pueden alcanzar relaciones de presiones de alrededor de 35:1, eficiencias del 85 – 90% y una temperatura de escape mayor a 1650K. En la **tabla 2.1** se muestran algunos fabricantes de turbinas de gas con algunos datos de diseño.

Tabla 2.1 Características de diversas turbinas de gas

MODELO	AÑO	CTU BTU/kW-h	RELACION DE PRESION	FLUJO MASICO		TEMPERATURA DE SALIDA	
				lb/s	kg/s		
ABB POWER GENERATION							
Mars	1986	10660	16	189.59	86	491°C	915.8 °F
GT 35	1968	10670	12	447.53	203	374°C	705.2 °F
GT 10	1981	9770	14	381.39	173	534°C	993.2 °F
GT 8C	1994	9919	15.47	870.82	395	517°C	962.6 °F
GT 11N	1987	10371	13.3	1541.03	699	505°C	941 °F
GT 11N2	1993	9977	14.6	1823.22	827	525°C	977 °F
GT 13D	1970	10564	11.9	1915.81	869	490°C	914 °F
GT 13E	1983	9862	13.9	2436.10	1105	516°C	960.8 °F
GT 13E2	1993	9558	15	3432.59	1557	525°C	485.6 °F
ALLISON GAS TURBINE							
501-KB5	1982	11900	10.1	75.83	34.4	549.44 °C	1021°F
501-KB5S	1982	11900	10.1	75.83	34.4	561.66 °C	1043°F
501-KB7	1992	-	-	98.98	44.9	535.55 °C	996°F
570-K	1979	11555	12.1	92.15	41.8	562.77 °C	1045°F
571-K	1986	10070	12.7	90.83	41.2	533.33 °C	992°F
GE POWER GENERATION							
PG5371	1987	11990	10.5	270	122.47	487.22 °C	909°F

(PA)							
PG6541(B)	1978	10880	11.8	302	136.98	538.88 °C	1002°F
PG7111(EA)	1984	10480	12.4	644	292.11	530 °C	986°F
MS7221(FA)	1991	9500	15	921	417.75	589.44 °C	1093°F
MS9171 (E)	1987	10100	12.3	890	403.69	538.33 °C	1001°F
MS9331(FA)	1991	9570	15	1327	601.91	589.44 °C	1093°F
LM6000	1992	8790	30	271	122.92	527.77 °C	982°F

Las turbinas de gas están regidas por el ciclo Joule-Brayton (**Figura 2.2**) en el cual se describe el funcionamiento de una turbina de gas, donde los procesos tanto de compresión como de expansión suceden en máquinas rotatorias.

El ciclo está integrado por cuatro procesos internamente reversibles, estos son:

1-2 Compresión isotrópica (en un compresor)

2-3 Adición de calor a presión constante (cámara de combustión)

3-4 Expansión isotrópica (en una turbina)

4-1 Rechazo de calor a presión constante.

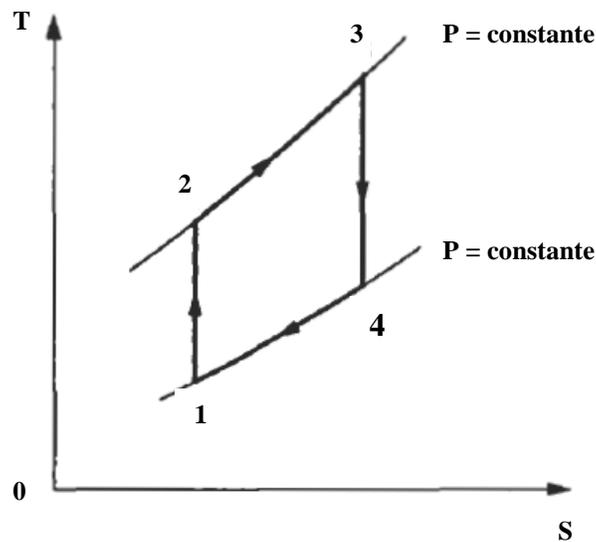


Figura 2.2 Ciclo Joule-Brayton

La temperatura más alta en el ciclo ocurre al final del proceso de combustión (estado 3) y está limitada por la temperatura máxima que los álabes de la turbina puedan resistir. Esto también limita la relación de

presiones que puedan utilizarse en el ciclo. En muchos diseños es común encontrar relaciones de presión de 11 a 16

El aire es usado en turbinas de gas con dos importantes objetivos, como suministro del oxidante necesario para la combustión del combustible y como un medio refrigerante para mantener la temperatura de diversos componentes dentro de los límites de temperatura seguros.

La eficiencia térmica de una turbina de gas es una relación entre el trabajo neto realizado, el cual es el trabajo producido por la turbina (puntos 3 a 4) menos el trabajo requerido por el compresor (puntos 1 a 2) y el calor suministrado en la cámara de combustión (puntos 2 a 3)

En las centrales eléctricas de turbinas de gas, la relación entre el trabajo del compresor y el trabajo de la turbina, denominada relación del trabajo de retroceso, es muy alta; usualmente más de la mitad de la salida de trabajo de la turbina se utiliza para activar el compresor. La situación es aún peor cuando las eficiencias tanto del compresor como de la turbina son muy bajas.

Para este estudio se va a utilizar como referencia datos de la turbina GE MS6001B (6B), para generación de energía la cual posee los siguientes parámetros en un ciclo simple y a carga base.

Tabla 2.2 Turbina GE MS6001B [21]

GE MS6001B (6B)	
Relación de presión	12.2 : 1
Flujo Másico	141.1 kg/seg
Temperatura de escape (T_4)	548°C (821 K)

Se van a emplear las condiciones ISO para calcular las condiciones de entrada en la turbina, por lo que serian una temperatura de 15°C (288K) y una presión de 101.32 kPa

Se calcula los principales puntos termodinámicos de esta turbina (Puntos, 1, 2, 3 y 4) de la siguiente manera.

En la entrada del compresor se tienen los siguientes datos, los cuales son las condiciones ISO, anteriormente descritas.

$$T_1 = 288K$$

$$P_1 = 101.32kPa$$

Buscando en las tablas de propiedades para el aire se obtienen la entalpia y la presión relativa del aire a dichas condiciones.

$$h_{1@288K} = 288.152 \text{ kJ/kg}$$

$$Pr_1 = 1.2020$$

Para calcular los datos a la salida del compresor se utiliza la relación de presión de la turbina, estos son datos del fabricante y es la relación de presión a la cual sale el flujo para entrar a la cámara de combustión, esto es;

$$\frac{P_2}{P_1} = 12.2$$

Con lo que podemos obtener el punto a la salida del compresor calculándola de la siguiente manera;

$$Pr_2 = Pr_1 \frac{P_2}{P_1} = 1.2020(12.2) = 14.664$$

Se busca en la tabla de propiedades del Aire usando la relación de presión calculada y se obtiene la temperatura y la entalpía a la salida del compresor.

$$T_{2@Pr = 14.664} = 583.060 \text{ K}$$

$$h_{2@583.060K} = 589.247 \text{ kJ/kg}$$

Por el otro lado, a la salida de la turbina se obtienen del fabricante la temperatura de $548^\circ\text{C} = 821 \text{ K}$, entonces se calculan igualmente las condiciones de entalpia y presión relativa a la salida de la turbina.

$$h_{4@821 \text{ K}} = 845.084 \text{ kJ/kg}$$

$$Pr_{4@821K} = 52.840$$

Obteniendo esa temperatura y aplicando la misma relación de presión del fabricante (12.2) se calcula las condiciones a la entrada de la turbina (T_3)

Siendo igualmente la relación $P_3/P_4 = 12.2$

$$Pr_3 = Pr_4 \frac{P_3}{P_4} = 12.2(52.84) = 644.65$$

Buscando nuevamente en la tabla de propiedades del aire, se obtenemos los datos del ciclo a la salida de la cámara de combustión.

$$T_{3@Pr = 644.65} = 1524.49 \text{ K}$$

$$h_{3@1524.49\text{ K}} = 1665.68 \text{ kJ/kg}$$

Por lo que para ir del punto 2 (salida del compresor) al punto 3 (entrada de la turbina) se requiere que se ingrese a la turbina una cantidad de calor equivalente a

$$Q_{in} = h_3 - h_2 = 1665.68 \text{ kJ/kg} - 589.247 \text{ kJ/kg} = 1076.433 \text{ kJ/kg}$$

El trabajo de la turbina (W_T) va a ser

$$W_T = h_3 - h_4 = 1665.68 \text{ kJ/kg} - 849.084 \text{ kJ/kg} = 816.596 \text{ kJ/kg}$$

Y el trabajo del compresor (W_C) será

$$W_C = h_2 - h_1 = 589.247 \text{ kJ/kg} - 288.152 \text{ kJ/kg} = 301.095 \text{ kJ/kg}$$

El trabajo neto (W_{Neto}) producido por la turbina, es el trabajo generado por la turbina (W_T) menos la cantidad de energía requerida para mover el compresor (W_C). A éste término también se le conoce como el trabajo de retroceso, el cual se define como la cantidad de energía que la turbina le va a proveer al compresor para que pueda funcionar, esto queda como sigue:

$$W_{Neto} = W_T - W_C = 816.596 \text{ kJ/kg} - 301.095 \text{ kJ/kg} = 515.501 \text{ kJ/kg}$$

La eficiencia térmica del ciclo se calcula con la relación de trabajo neto producido por el sistema (W_{Neto}) y la cantidad de calor ingresada al sistema (Q_{in}) esto es:

$$\eta_{Term} = \frac{W_{Neto}}{Q_{in}} = \frac{515.501 \text{ kJ/kg}}{1076.433 \text{ kJ/kg}} = 0.478 \rightarrow 47.8\%$$

Por último se calcula la potencia generada por la turbina esto es

Los datos calculados para una turbina GE MS6001B (6B), para generación de energía se encuentran resumidos en la **figura 2.3** en sus diferentes etapas.

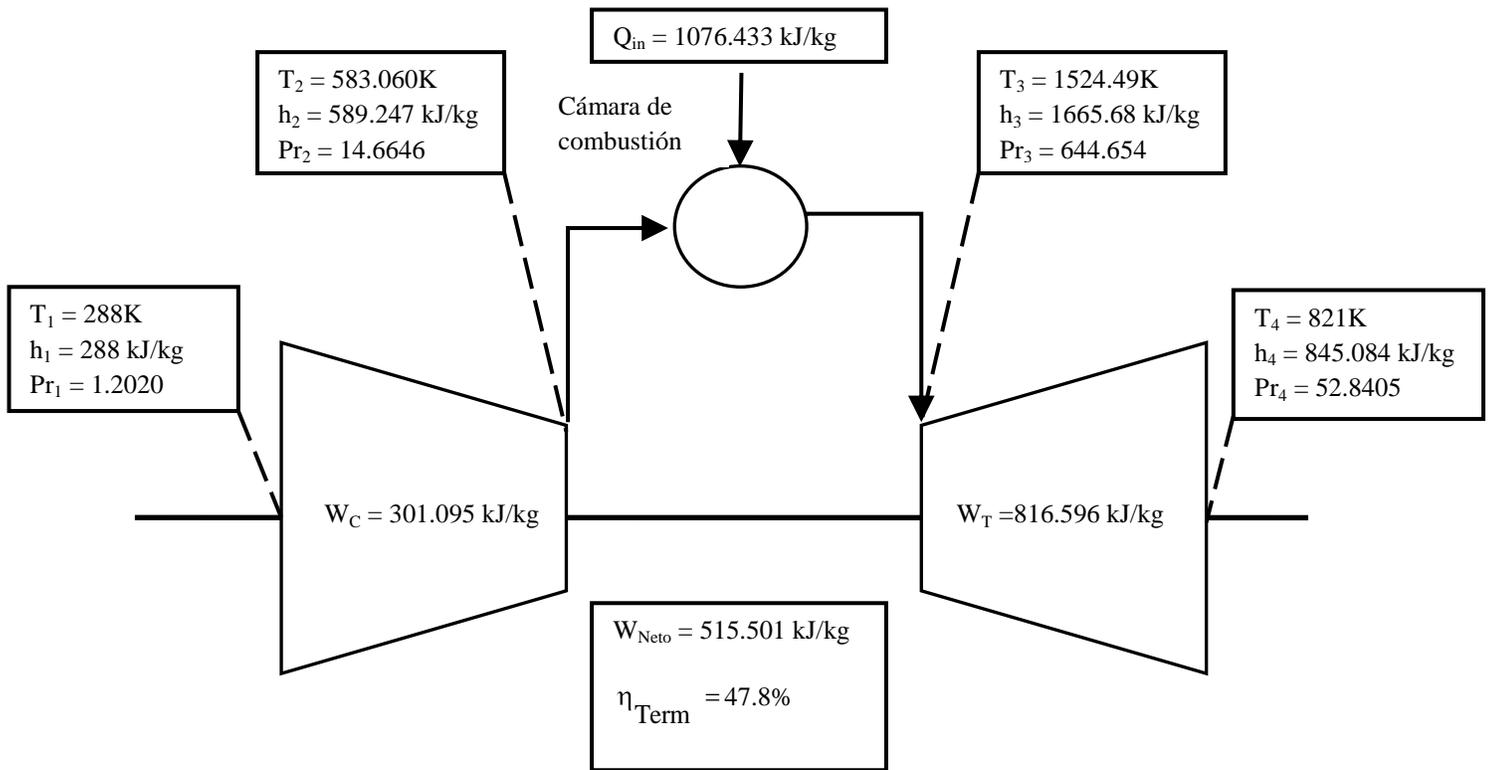


Figura 2.3 Comportamiento termodinámico de una turbina GE MS6001B.

Con esto, se encontró que la cantidad de energía requerida por la turbina es de 1076.433 kJ/kg, para ir del punto 2 al punto 3, que es necesaria para cumplir con las condiciones descritas por el fabricante.

El lector deberá notar que en ningún momento se incluyeron eficiencias ni del compresor, ni de la turbina, así como tampoco fueron incluidas las pérdidas de presión que se llegan a dar en la cámara de combustión, la razón de que se haya omitido tales consideraciones, que en la práctica se deben tomar en cuenta, es debido a la simplificación de los cálculos así como, el enfocarnos a la tarea que nos compete y no perder en algún momento tal objetivo. Es por ello que los datos, anteriormente obtenidos son ideales y esto se debe tener en cuenta en todo momento.

2.2 Cámara de Combustión.

El tema de combustión es amplio y variado e involucra una amplia variedad de procesos y fenómenos, pero tal vez, la manera más simple de describirlo es como una reacción exotérmica entre un combustible y un oxidante. Principalmente en las turbinas de gas, el combustible puede ser gaseoso o líquido, pero el oxidante siempre será el aire.

El tema de combustión involucra tanto a la física como a la química. El contexto físico se encuentran incluidas materias como la transferencia de calor, transferencia de masa, termodinámica, dinámica de los gases y fluidos. Los procesos químicos son importantes principalmente para el estudio de emisiones contaminantes.

2.2.1 Tipos de flamas.

La combustión se produce en muchas formas, de las cuales, no todas van acompañadas de llamas o luminiscencia. Dos regímenes importantes de la combustión pueden ser distinguidos:

- **Deflagración:** Este es un proceso rápido que requiere menos de 1 ms para quemar el 80% del combustible total. Se caracteriza por la presencia de una flama que se propaga a través de la mezcla no quemada. La flama, se puede definir como un cambio químico rápido en una capa de fluido muy delgada, con la participación de un gradiente de temperatura que va acompañado por una luminiscencia. Desde el punto de vista macroscópico, el frente de flama puede ser visto como una interfaz entre los combustibles quemados y la mezcla no quemada. En comparación con la mezcla no quemada, el volumen y temperatura de los gases quemados son mucho mayores, pero en contraste, su densidad es mucho menor. Las ondas de deflagración en los combustibles hidrocarburos, se propagan normalmente a velocidades por debajo de 1 m/s. *[14]*
- **Detonación:** El rasgo característico de la detonación es una onda de choque que está conectada con el apoyo de una zona de reacción química. Las ondas de detonación pueden alcanzar velocidades supersónicas que van desde 1 hasta 4 km/s. Este proceso no puede ocurrir en una mezcla convencional aire/ combustible usado en la combustión de una turbina de gas, pero la posibilidad puede surgir en una situación en las que se inyecta oxígeno para facilitar el encendido y acelerar la turbina. En el ambiente militar, se está experimentando con este tipo de combustión. *[14]*

2.2.2 Descripción cámara de combustión.

La combustión es un proceso continuo en el cual el combustible se quema por medio del aire suministrado por el compresor. El aire comprimido y el combustible se inyectan a la cámara mezclándose y produciéndose un incremento de temperatura por medio de una chispa, la cual debe ser autosuficiente en el plazo en que la turbina se encuentre funcionando.

La cámara de combustión es uno de los componentes críticos de la turbina de gas, debido principalmente a que la mayoría del tiempo opera a temperaturas extremas. Otra función de la misma, es el proporcionar una distribución de temperatura uniforme alrededor de la entrada de la turbina la cual debe reducir al mínimo los contaminantes creados por el proceso de combustión; esto se lleva a cabo por medio de inyección de agua o vapor para el control de emisiones contaminantes. Los mecanismos de control de emisiones no es el fin de este trabajo por lo cual únicamente se hará mención de los mismos.

Una cámara de combustión de turbina de gas debe satisfacer una amplia gama de requisitos cuya importancia relativa varía entre cada tipo de turbina. Sin embargo, los requisitos básicos de todas las cámaras de combustión se pueden enumerar de la siguiente manera:

- Alta eficiencia en la quema de combustible, el cual debe ser completamente quemado de manera que toda la energía química sea liberada en forma de calor.
- Amplios límites de estabilidad, la flama debe permanecer encendida a diversas relaciones de aire / combustible.
- Mínima pérdida de presión.
- Una distribución uniforme de temperatura de salida, esto con el fin de maximizar la vida de las partes de la turbina.
- Mínimas emisiones de gases contaminantes.
- La ausencia de pulsaciones de presión y otras manifestaciones de inestabilidad inducida por la combustión.
- Diseño fácil de fabricar y que esté asociado con un costo en su producción mínimo.
- Fácil Mantenimiento.

- Durabilidad.
- Flexibilidad en el uso de diversos combustibles como petróleo, combustibles sintéticos y biomasa.

Aunque las turbinas generadoras de potencia tienen una amplia variedad de combustibles, los mayormente usados son destilados líquidos procedentes del petróleo y el gas natural [12]. Existen una poca cantidad de turbinas que operan usando combustibles residuales, estos combustibles deben ser tratados antes de ingresar en la turbina y representa un costo extra en su uso.

Se estima que en la cámara de combustión se tiene una relación aire/combustible de 100:1, a lo largo de toda la cámara de combustión, estas condiciones sugieren que una parte del aire comprimido se utiliza para efectuar la combustión completa del combustible, de alrededor de 14.4 kg de aire por 1 kg de combustible, y el resto se necesitará para enfriar los gases de combustión hasta la temperatura T_3 requerida.

Así mismo, se estima que la relación estequiométrica es de aproximadamente 15:1 la relación aire/combustible, lo que representa quemar el total del combustible ingresado.

El aire que ingresa a la cámara de combustión se divide en tres secciones, tal como se representa en la **figura 2.4**.

- **Aire primario:** Corresponde aproximadamente del 15% al 20% del total del aire ingresado a la cámara, y se mezcla directamente con el combustible, creando una mezcla aire-combustible relativamente rica con el objetivo de obtener una temperatura elevada. La función principal de esta zona es de afianzar la llama y disponer de tiempo suficiente, desarrollo de temperatura y turbulencia, para lograr una combustión completa en la mezcla aire / combustible de entrada. El establecer un patrón de flujo es esencial para lograr la total quema de la mezcla de los combustibles junto con la del oxidante. Muchos tipos de diseños de flujo son empleados, pero una característica común a todos es la creación de una inversión de flujo toroidal que arrastra y recircula una porción de los gases calientes hacia la sección de los gases que ingresan a la cámara para con esto proporcionar un encendido continuo. [14].
- **Aire secundario:** Corresponde aproximadamente el 30% del total del aire, se introduce por medio de orificios incluidos en el tubo de llama y tiene como objetivo el completar la combustión

para que de esta manera el rendimiento sea elevado. La inyección del aire debe ser en puntos estratégicos a fin de evitar que la llama se enfríe localmente dando lugar a una drástica disminución en la velocidad de combustión de la zona. El aire secundario es el responsable de proporcionar un coeficiente de exceso del aire o mezcla rica.

Si la temperatura de la zona primaria es superior a 2000 K, comenzaran a aparecer reacciones de disociación con el resultado de la aparición de importantes concentraciones de Monóxido de carbono (CO) y de hidrógeno en los gases de flujo, si estos gases pasan directamente a la zona de dilución y se enfrían rápidamente con la adición de grandes cantidades de aire, la composición del gas podría ser “congelado” y el monóxido de carbono (CO) - el cual es un contaminante y una medida de la ineficiencia de la combustión - reducen la temperatura a un nivel intermedio mediante adición de pequeñas cantidades de aire disminuyendo la formación de hollín y permitiendo la combustión del monóxido de carbono y de cualquier otro hidrocarburo sin quemar (UHC) que llegue a esta zona [14].

- Aire terciario o zona de dilución: El aire restante, 50% a 55% se mezcla con los productos de la combustión en la zona de dilución, con el objeto de reducir la temperatura hasta que sea adecuada para ingresar a la entrada de la turbina. El papel de la zona de dilución es el admitir aire remanente que queda una vez que se cumplió el porcentaje que se necesita para la combustión y para enfriar los gases, el fin es el de proporcionar una corriente de salida con una distribución de temperatura aceptable para la turbina. Esta distribución de temperatura se suele describir en términos de “calidad transversal de temperatura” y por lo general se puede lograr mediante el uso de una larga zona de dilución o tolerando un alto factor de pérdida de presión. [14].

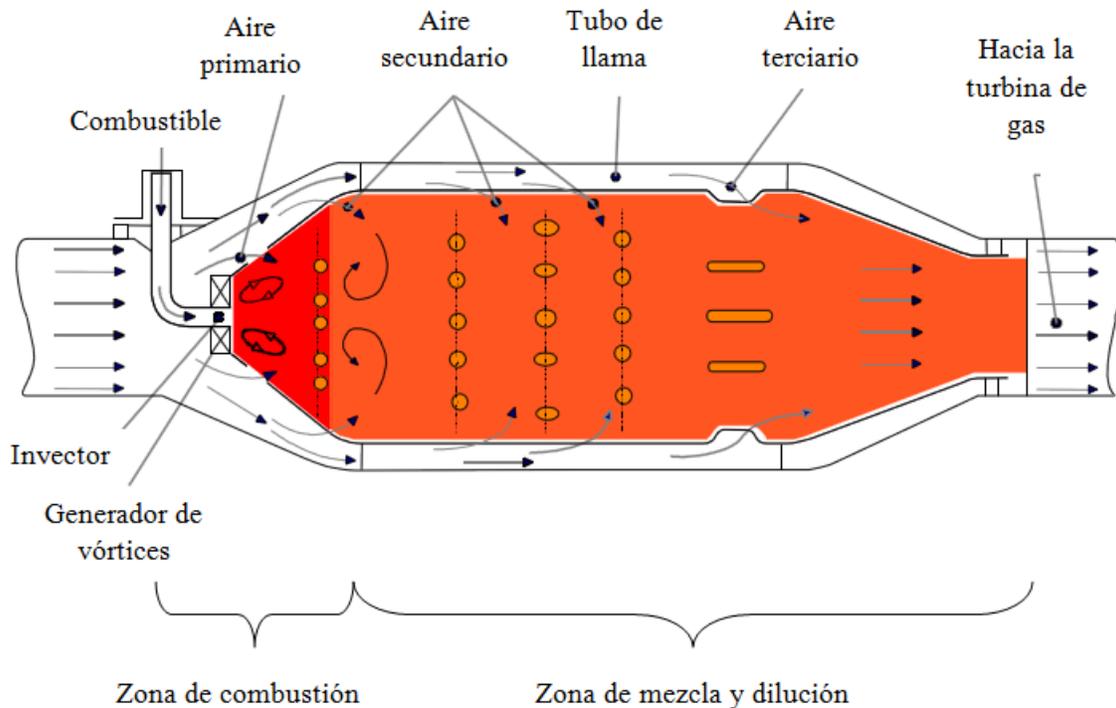


Figura 2.4 Distribución del aire en la cámara de combustión. [11]

El proceso de combustión tiene lugar en su totalidad dentro de la cámara de combustión a fin de evitar que los álabes de la turbina, estén sometidos a altas temperaturas y el análisis se hace en base seca para establecer el exceso de aire y con ello determinar la temperatura a la entrada de la turbina (T_3).

La combustión de combustibles líquidos, consiste en una fina mezcla entre las gotas del combustible junto con el aire, rompiendo con esto las largas cadenas de hidrocarburos en fracciones más pequeñas, conteniendo las moléculas de hidrocarburos, las moléculas de oxígeno y las que se produjeron de las reacciones químicas. Una mezcla estequiométrica (aire – combustible) es necesaria para un incremento de temperatura, así como para que el proceso de combustión se realice lo suficientemente rápido. La combustión de un combustible gaseoso implica menos procesos, pero aún así aplican muchos de los mismos pasos.

2.2.3 Relación aire/combustible.

El cálculo de temperatura es esencialmente el marco de solución a un problema de equilibrio químico. La máxima temperatura que puede alcanzar los productos de combustión es la temperatura adiabática de llama. La cual es la temperatura que se obtiene si todo el calor desarrollado durante el proceso se utiliza íntegramente para calentar los productos.

En los cálculos de combustión, uno requiere la variación de la temperatura debido a la relación oxidante/combustible. Por lo tanto, en la solución de los problemas de temperatura, es normal tener igual cantidad de combustible como de oxidante, dando una relación 1 a 1.

La temperatura de la llama (**figura 2.5**) se encuentra directamente en función del radio aire/combustible, este radio equivalente aire/combustible está definido como cantidad de combustible dividida entre la cantidad de oxidante en estado real de la mezcla dividido entre cantidad de combustible entre la cantidad de oxidante en estado estequiométrico. Está representada por el símbolo ϕ

$$\frac{a}{s} = \frac{a}{s} \quad [2.1]$$

En donde (a) se refiere a las condiciones reales en las que se están dando la relación aire/combustible y (s) se refiere a las relación estequiométrica

Revisando el diagrama, en el lado de la mezcla rica, el sistema se encuentra sobre-oxigenado lo que el exceso de oxígeno debe ser calentado a la temperatura del producto, provocando que la temperatura baje a partir del valor estequiométrico. De la misma manera, si hay poco oxidante presente, es decir, no hay suficiente oxígeno para quemar todo el carbón y el hidrógeno, la energía liberada es menor y la temperatura desciende con respecto al punto estequiométrico. En la zona de altas temperaturas se somete a la descomposición térmica con la formación de moléculas menos pesadas y los átomos del carbono.

Dado que la mayoría de las maquinas térmicas actuales utilizan como oxidante el aire para su combustión, es conveniente determinar la temperatura de la flama a cualquiera relación aire/combustible

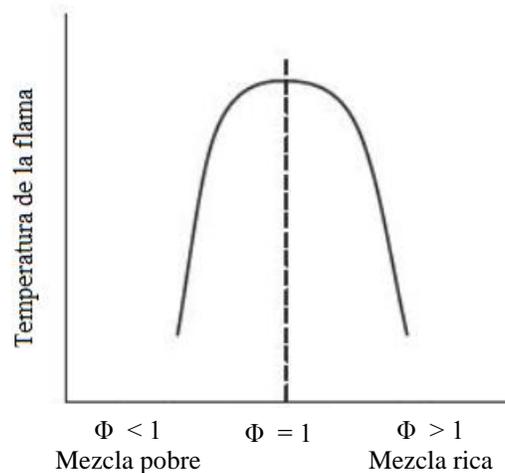


Figura 2.5 Variación de la temperatura de la llama con la relación aire/combustible Φ [13].

Las turbinas de gas funcionan con un elevado exceso de aire (λ) para que la temperatura de los productos de combustión al contacto con los alabes no sea excesiva y no existan problemas de corrosión o fatiga en los mismos evitando la deformación y de esta manera, manteniéndola dentro de límites aceptables.

La relación aire/combustible suele expresarse en una base de masa y se define como la relación entre la masa del aire y la masa de combustible en un proceso de combustión. **Figura 2.6**

$$AC = \frac{m_{\text{aire}}}{m_{\text{comb}}} \quad [2.2]$$

La masa "m" de una sustancia se relaciona con el número de moles "N" por medio de la relación y en donde "M" representa la masa molar.

$$m = NM \quad [2.3]$$



Figura 2.6 Relación aire/combustible representada en masa.

De esta forma, a la cámara de combustión ingresa "L" cantidad de aire comprimido (kg/seg), más "B" cantidad de combustible (kg) necesario para producir la combustión completa dentro de la cámara, por lo que el consumo de combustible está definido como:

$$\text{—} \quad [2.4]$$

En donde

Hu: es el calor específico del combustible

Q: Calor que entra a la cámara de combustión

La presencia de gases de combustión modifica la entalpía y la entropía a la entrada de la turbina. Para calcular los nuevos valores es necesario conocer el exceso de aire (λ) y el porcentaje de gases en el aire (x).

$$\frac{\text{---}}{\text{---}} \quad \text{---} \quad [2.5]$$

$$\text{---} \quad [2.6]$$

Muchas veces es muy útil estudiar la combustión de un combustible con la suposición de que la combustión es completa. Un proceso de combustión está completo si todo el carbono en el combustible se transforma en CO_2 , todo el hidrógeno se transforma en H_2O y todo el azufre, en caso de existir, se transforma en SO_2 . Por el contrario, un proceso de combustión es incompleto si los productos de combustión contienen algo de combustible o componentes no quemados, como C, H_2 , o bien OH.

El oxígeno insuficiente es una razón clara para la combustión incompleta, pero no la única, también el exceso de aire en la cámara de combustión puede ser un factor para la combustión incompleta, la cual puede atribuirse al deficiente mezclado en la cámara de combustión durante el tiempo en el que el oxígeno y el combustible se encuentran en contacto. Otra causa de combustión incompleta es la disociación, presentándose a altas temperaturas.

La temperatura de la flama es probablemente la propiedad mas importante en combustión debido a que es una medida de la reacción química. La temperatura adiabática se refiere a la temperatura máxima de la flama que se puede obtener de la reacción química, esto es, si todos los elementos que comprenden la reacción fueran transformados en productos. En la práctica, existe perdida de calor debido a la radiación y convección, así que el concepto de flama adiabática es rara vez logrado, de cualquier forma, es un importante concepto para determinar la eficiencia de la combustión y para cálculos de transferencia de calor.

Los productos de la combustión son principalmente CO_2 y H_2O pero en temperaturas mayores a 1800 K, los compuestos del combustible se comienzan a disociar, absorbiendo calor del proceso de combustión para su formación, reduciendo la temperatura de la reacción. Cabe recalcar que para fines de este trabajo, no se tomara en cuenta el proceso de disociación que se produce a altas temperaturas, esto con el fin de facilitar los cálculos pero en la realidad se espera que ocurra así.

2.2.4 Relación estequiométrica.

Si dentro de la reacción se produce con cambios insignificantes en el flujo de energía cinética y potencial y no implica ninguna forma de trabajo más allá de la requerida para el flujo, el calor añadido es igual al incremento de la entalpía en el sistema.

$$Q = \Delta H \quad [2.7]$$

Uno de los puntos más importantes a considerarse en el aspecto de cálculo termodinámico en las reacciones químicas es el cambio en la energía o el calor contenido asociado a la reacción a temperaturas específicas, donde cada uno de los reactivos y productos se encuentra en un estado estándar apropiado. Este cambio se conoce como la energía o el calor de reacción a la temperatura especificada.

El símbolo termodinámico que representa la propiedad de la sustancia en el estado estándar a una temperatura dada se escribe por ejemplo como H°_T , E°_T , en donde el signo “ $^\circ$ ” especifica el grado de referencia y el subíndice “ T ” representa la temperatura específica.

$$PV = RT \quad [2.8]$$

$$H^\circ = E^\circ + (PV)^\circ = E^\circ + RT \quad [2.9]$$

La energía contenida a 0 K sería dada de la siguiente manera:

$$H^\circ_0 = E^\circ_0 \quad [2.10]$$

El calor a cualquier temperatura de referencia se puede determinar de la siguiente manera, sabiendo la energía o el calor contenido a 0 K.

$$(H^\circ - H^\circ_0) = (E^\circ - E^\circ_0) + RT = (E^\circ - E^\circ_0) + PV \quad [2.11]$$

El valor de $(E^\circ - E^\circ_0)$ es determinado a partir de información espectroscópica y es en realidad la energía en el interior (de rotación, vibración) y externa (de translación) de la molécula. Entalpía ($H^\circ - H^\circ_0$) sólo tiene sentido cuando hay un grupo de moléculas; y representa la capacidad de ese grupo de moléculas con energía para hacer trabajo (PV). En este sentido, una molécula puede tener energía interior pero no entalpía.

Uno de los hechos termodinámicos más importantes que se deben de conocer al estar estudiando una reacción química, es el cambio en energía o el calor contenido en la reacción a cierta temperatura específica, donde cada uno de los reactantes y productos se encuentran a cierta temperatura de referencia.

El calor producido (Q_p) depende de la temperatura (T) a la cual los reactivos y productos son evaluados. El calor de reacción a una temperatura T_0 puede ser relacionada a otra temperatura T_1 . Considérese la configuración de reacción presentada en la **Figura 2.7**. De acuerdo a la primera ley de termodinámica, el calor producto de los reactivos a una temperatura T_0 y convertidos en productos a una temperatura T_1 puede seguir cualquiera de los dos caminos, sea por A o por B llegando al mismo punto.

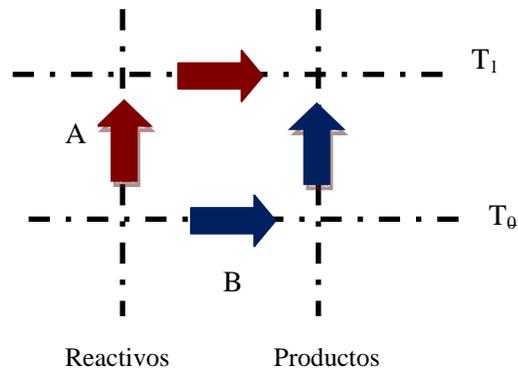


Figura 2.7 Entalpías de la combustión a diferentes temperaturas.

En forma de ecuación esto se representaría de la siguiente manera:

[2.12]

Donde “n” representa el numero de j-reactivos o i-productos

2.2.5 Productos de la combustión.

Todas las sustancias en los combustibles sólidos, líquidos y gaseosos cuentan con combinaciones químicas complejas, sin embargo, el análisis cuantitativo de las composiciones que forman los combustibles sólidos y líquidos, exige la realización de investigación en laboratorio, una tarea difícil y compleja. Por eso, para combustibles sólidos y líquidos, la composición se expresa no por las

composiciones, si no por los contenidos de los elementos separados (en tantos por ciento) con referencia a la masa inicial del combustible.

Para los combustibles gaseosos, existe una forma relativamente sencilla para calcular la composición química de los mismos, es por ello que la composición de los combustibles gaseosos se expresa habitualmente por las partes volumétricas de los gases separados (CH_4 , C_mH_n , CON , CO_2 , H_2 , N_2 , O_2 etc.) en tantos por ciento al volumen del gas seco en condiciones de referencia.

Los elementos combustibles del combustible son: el carbono, el hidrógeno y el azufre. Así mismo, se encuentran ligados a ellos elementos otros elementos como el oxígeno y el nitrógeno que no forman parte de la combustión en sí, sino más bien forman un lastre interior del combustible. La ceniza y la humedad componen el lastre exterior.

Tanto el oxígeno como el nitrógeno forman parte de los compuestos orgánicos y su presencia en el combustible hace que se reduzca el contenido de los elementos de los combustibles (carbono e hidrogeno principalmente) y por esto disminuye su valor térmico, además de que el oxígeno contenido en el combustible hace que se reduzca el calor específico del combustible.

El elemento principal de los combustibles que condiciona la emisión básica de calor es el carbono, el cual posee un alto calor específico (34,1MJ/kg) y generalmente representa un 40 – 90% de la masa de los combustibles sólidos y el 82 – 85% de la masa de los combustibles líquidos.

Por otra parte, el hidrógeno posee un alto calor específico (120,5 MJ/kg) pero a consecuencia de su cantidad relativamente pequeña (3 – 4% en los combustibles sólidos y un 10 – 11% en el combustible líquido) la parte de hidrógeno en el calor generado son significativamente menor a la producida por el carbono.

El azufre tiene el calor específico para la combustión más bajo de todos (entre el carbono e hidrógeno) apenas el 9,3 MJ/kg, y también se encuentra en cantidades relativamente pequeñas (hasta 5%) y por eso no presenta un valor importante para la combustión.

La humedad contenida en los combustibles es indeseable, debido a que reduce el calor generado. Esto se debe por dos razones, la primera a que reduce el contenido en el combustible de elementos carburantes, y principalmente, porque para evaporar la humedad, esta absorbe el calor generado por la misma combustión.

Los hidrocarburos gaseosos con base en el metano, como el gas natural, están predispuesto a sufrir una descomposición térmica. La temperatura de la descomposición es un poco más alta que la temperatura de inflamación del gas. Es la principal importancia de realizar un buen mezclado entre aire-combustible, esto

es, que las moléculas del combustible entren en contacto con las moléculas del oxidante a la cantidad necesaria para realizar la combustión completa.

Los componentes de los combustibles intervienen en una reacción química con el oxígeno en una relación definida. El flujo másico de oxígeno y la cantidad de los productos de la combustión generados son establecidos de las ecuaciones estequiométricas de combustión tomando un mol de cada uno de los componentes del combustible.

El proceso de combustión para combustibles gaseosos se puede dividir en dos fases:

- Formación de la mezcla aire-combustible o de la mezcla carburante
- El calentamiento, la inflamación y la combustión del carburante.

El proceso de combustión para combustibles gaseosos se hace llamar una combustión homogénea, esto es, que tanto el combustible como el oxidante se encuentran en el mismo estado, es decir gas –gas. Durante el proceso de combustión no existe un cambio de estado y la fase (gas) permanece igual a lo largo de todo el proceso de combustión (mezclado, gasificación y combustión).

2.3 Emisiones.

Las emisiones contaminantes producto de los procesos de combustión se han convertido en motivo de gran preocupación pública debido a su impacto en la salud y el medio ambiente. La última década hemos sido testigos de los rápidos y constantes cambios tanto a las regulaciones para el control de las emisiones de gases de las turbinas como en la constante evolución de la tecnología para cumplir esos nuevos reglamentos. Las turbinas estacionaras, el principal instrumento en el desarrollo de las industrias de gas y petróleo, han adquirido nuevas aplicaciones tales como su uso en plantas de ciclo combinado y en muchas otras áreas de generación de calor y electricidad.

Las emisiones que se encuentran en el escape de una turbina se componen de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O), hidrocarburos no quemados (UHC), partículas suspendidas (principalmente carbono), NOx y el exceso de oxígeno y el nitrógeno atmosférico, CO₂ y H₂O, no siempre son consideradas como emisión debido a que son una consecuencia natural de una quema completa de combustible.

Los principales contaminantes y sus efectos de una turbina de gas son enlistados en la **Tabla 2.3**. De ellos, el CO reduce la capacidad de la sangre para absorber oxígeno y en altas concentraciones puede causar asfixia e incluso la muerte; el UHC no sólo es tóxico, si no también se combina con los NOx para formar smog fotoquímico; que son Partículas suspendidas (generalmente llamado hollín o humo) que crean problemas de visibilidad y suciedad de la atmósfera. No es normalmente considerado como tóxico en los

niveles de emisión, pero estudios recientes realizados por Seaton [14], señalan que existe una fuerte asociación entre el asma y otras enfermedades respiratorias, producto de la concentración atmosférica de partículas microscópicas de NOx (NO + NO₂). Estas, no solo contribuyen a la producción de smog fotoquímico en el suelo, sino también causan daño a la flora y acrecienta el problema de la lluvia ácida. De igual modo, los NOx es un agente reductor de la capa de ozono, el cual, evita una mayor penetración de la radiación ultravioleta del sol, el cual ha sido relacionado con el cáncer de piel.

Un contaminante que preocupa son los óxidos de azufre, principalmente SO₂ y SO₃, que se forman cuando los compuestos que contiene azufre en el combustible, reaccionan con el oxígeno del aire en la combustión. Estos óxidos son tóxicos y corrosivos y son promotores de la formación de ácido sulfúrico en la atmósfera.

Debido a que prácticamente todo el azufre en el combustible se oxida, la única estrategia viable es la eliminación del azufre en el combustible antes de la combustión.

Tabla 2.3 Principales contaminantes emitidos por la turbina de gas.

Emisiones	Efecto
Monóxido de carbono (CO)	Tóxicos
Hidrocarburos no quemados (UHC)	Tóxicos
Partículas suspendidas (C)	Visibles
Oxidos de Nitrógeno (NOx)	Tóxicos, precursor químico del smog y del agotamiento de la capa de ozono en la estratósfera
Oxidos de Sulfuro (SOx)	Tóxicos, corrosivo

2.3.1 Regulaciones.

Las Normas relacionadas con las emisiones de las turbinas de gas estacionarias tienden a ser muy complejas, debido a que la legislación varía de un país a otro, además, se complementan con las regulaciones locales del sitio y a su vez, se encuentran en base en el uso, tamaño de la planta y tipo de combustible usado.

Por el gran número de turbinas usando gas natural, las emisiones de UHC, las partículas suspendidas y los SOx se consideran despreciables, y la mayor parte de las regulaciones son dirigidas a restringir la cantidad de NOx. En Estados Unidos, la Agencia de Protección del medio ambiente (EPA) ha promulgado normas de emisiones (*Federal Register 71 FR 38482, fecha Julio 6, 2006*) las cuales varían tanto del combustible empleado como del uso que se le dé (Generación de energía o utilitario):

- Para generación de energía, usando gas natural, los límites de NOx son: 42 ppmv debajo de 3 MW; 25 ppmv (3-110 MW) y 15 ppmv (mayores a 110MW)
- Para producción de energía, usando otro combustible diferente al gas natural, los límites de NOx son: 96 ppmv debajo de 3 MW, 75 ppmv (3-110 MW) y 42 ppmv (mayores a 110 MW).
- Para turbinas de uso utilitario, por debajo de 3.5 MW los límites de NOx son: 100 ppmv usando gas natural y 150 ppmv para combustibles diferentes al gas natural.
- Las emisiones de SOx están limitadas a 110 ng/J de la producción de energía bruta para turbinas que se encuentran dentro de zonas continentales y 780 ng /J de energía bruta para turbinas que se encuentran en zonas fuera de la zona continental [14]

Hay que tomar en consideración que los límites antes mencionados se expresan en partes por millón por volumen (ppmv), y hacen referencia al 15% de oxígeno en condiciones secas. El objetivo es en parte para eliminar la ambigüedad cuando se comparan diversas fuentes de datos, haciendo notar que las turbinas que queman menos combustibles se espera que emitan menos cantidad de NOx..

La fórmula que nos ayuda para hacer estas comparaciones es:

$$\frac{NOx}{O_2} \quad [2.13]$$

En donde las concentraciones de NOx son expresadas en ppmv (seco) y el O₂ contenido es expresado en porcentaje del volumen

2.3.2 Mecanismo de formación de Contaminantes.

Los niveles de contaminantes a la salida de las turbinas de gas se pueden relacionar directamente con la temperatura, el tiempo y las concentraciones en el proceso de combustión. Estos varían de un combustor a otro, con cambios en sus condiciones de operación. La naturaleza de la formación de contaminantes es tal, que las concentraciones de CO y UHC son más altos en condiciones de baja potencia y disminuyen con el aumento de la misma. En contraste, los NOx y el humo son bastante insignificantes cuando la turbina opera a baja potencia, estos alcanzan sus máximos valores en condiciones de mayor potencia.

a) Monóxido de Carbono

Cuando la zona de combustión recibe una mezcla rica en combustible, grandes cantidades de CO se forman debido a la falta de oxígeno insuficiente para completar la reacción y crear CO₂. Sin embargo, si la mezcla de combustible es estequiométrica o la mezcla es moderadamente rica, cantidades significativas de

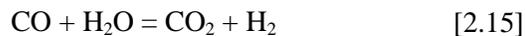
CO estarán presentes debido a la disociación del CO₂. En la práctica, los niveles de CO tienden a ser mayores que los pronosticados por las ecuaciones de equilibrio, lo que entra en conflicto con esta teoría, la cual sugiere que la combustión incompleta es la fuente de la mayor parte de las emisiones de CO.

En principio, debería de ser posible reducir las emisiones de CO formadas en la zona primaria de la combustión a un nivel muy bajo con la progresiva entrada de aire adicional en el flujo para lograr una reducción gradual de la temperatura de los gases quemados. Sin embargo, una vez formado, el CO es relativamente resistente a la oxidación, y en un sentido práctico, mucha de su oxidación es producto de la velocidad en la que se efectúa la combustión completa. [14]

A altas temperaturas, la reacción principal para la eliminación de CO es:



A temperaturas bajas la reacción sería:



Dando como resultado la eliminación del CO en ambas reacciones.

Influencia de la temperatura del aire del medio ambiente.

En este rubro se han hecho varias investigaciones, en las cuales se ha observado que las emisiones de CO para una temperatura ambiente de 287 K fueron 3 o 4 veces más altas que los valores correspondientes a un medio ambiente de 298K. La correlación de estos datos llevo a la siguiente expresión para el cálculo del efecto del aire ambiental sobre el CO. [14]

$$\text{CO}_T / \text{CO}_{288} = 1 - 0.0634(T-288) \quad [2.16]$$

En donde CO_T, son las emisiones de CO en ppmv para 15 % de oxígeno a la temperatura T ambiente y CO₂₈₈ son las emisiones de CO in ppmv para 15% de oxígeno a 288 K. Esta ecuación sirve para remarcar la fuerte dependencia entre la temperatura ambiente y las emisiones, además, ayuda a explicar porque existen algunas discrepancias con algunos datos al hacer mediciones de CO en un periodo de tiempo.

b) Hidrocarburos no Quemados (UHC).

Dentro de los UHC, también se incluyen combustibles que emergen del combustor en forma de gotas o vapor, Normalmente se asocian con una pobre atomización, poca velocidad en la combustión, efectos del aire enfriado o cualquier combinación de estos. Las reacciones que se siguen para la formación de UHC son mucho más complejos que para la formación de CO, pero en general se encontró que los mismos factores que influyen en las emisiones de CO, también influyen en las emisiones de UHC.

c) Óxidos de Nitrógeno (NOx).

La mayoría de los óxidos de nítrico (NO) formados por la combustión, se oxidan posteriormente para formar NO₂. Por esta razón, es que el trato de NO y NO₂ se realiza como uno solo y se expresan los resultados en términos de NOx en lugar de NO. Los NOx pueden ser producidos por cuatro mecanismos diferentes: NOx térmicos, mecanismos de óxido nitroso, NOx rápidos (*prompt NOx*) y NO del combustible.

NOx térmicos.

Estos se producen por la oxidación del nitrógeno atmosférico en las regiones de alta temperatura de la flama y en los gases producidos después de la flama. El proceso es endotérmico y se produce a temperaturas mayores a 1850K. El proceso es principalmente gobernado por las siguientes ecuaciones, las cuales se conocen como el "Mecanismo de Zeldovich" (*Zeldovich mechanism*).



Para romper el fuerte triple vínculo de las moléculas de N₂ es necesario de altas temperatura. La ecuación [2.18] es pieza fundamental para determinar la cantidad de NOx térmicos que se van a formar. Esta ruptura se produce a temperaturas mayores a 1400K (1100 C)

La máxima formación de NO se encuentra en la sección de mezcla rica en la relación aire/combustible ($\Phi > 0.4$) y es una consecuencia de la competencia entre el combustible y el nitrógeno por el oxígeno disponible en la mezcla. Aunque la temperatura de combustión es mayor en el lado de la mezcla rica, el oxígeno disponible es consumido principalmente por el combustible. La fuerte relación que existe entre la formación de NO con la temperatura es mostrada en la **figura 2.8**. En esta figura vemos que la producción de NO se reduce con relación a la disminución de temperatura, así también se observa que la mayor cantidad de NO que se producen, ocurre en los primeros instantes que se está produciendo la combustión.

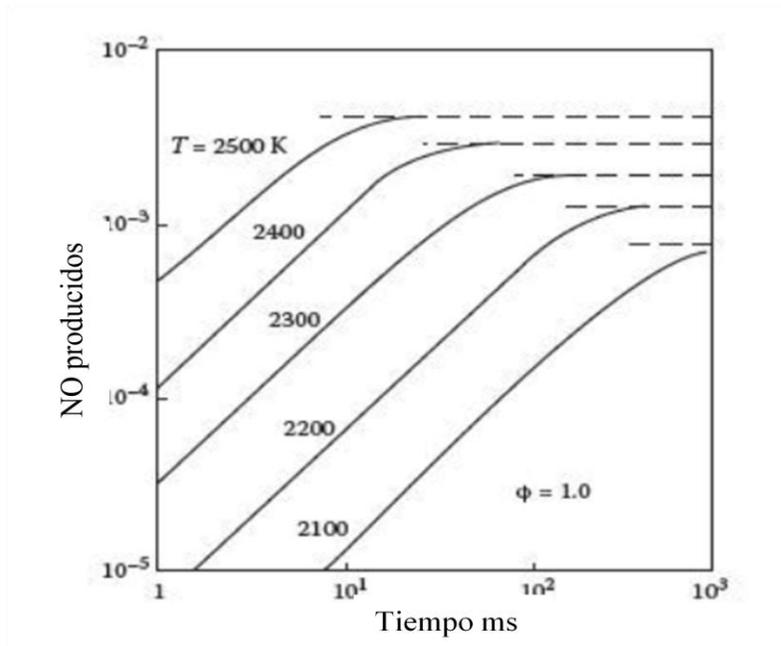


Figura 2.8 Formación de NOx en función del tiempo y temperatura; $P = 1 \text{ Mpa}$ [14]

Influencia del tiempo de residencia.

El tiempo de residencia de la combustión también puede influenciar las emisiones de NOx, tal y como se muestra en la **figura 2.9**, donde las emisiones de NOx aumentan con el incremento del tiempo de residencia, excepto para mezclas muy pobres ($\Phi \approx 0.4$), en donde la tasa de formación es tan baja que llega a ser insensible con respecto al tiempo.

Estos hallazgos tienen importantes implicaciones prácticas para el diseño de la cámara de combustión, especialmente para diseños de pre-mezcla.

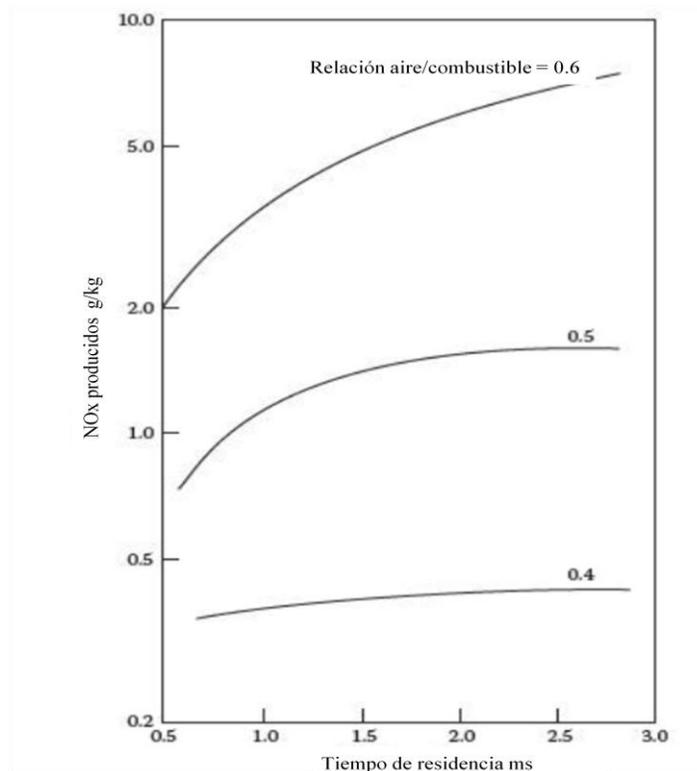


Figura 2.9 Efectos en el tiempo de residencia en los NOx

En conclusión, los puntos clave en relación a la formación de los NOx térmicos se pueden resumir de la siguiente manera;

- La formación de NOx térmicos están controlados en gran medida por la temperatura de la llama.
- Pocas cantidades de NO se forman a temperaturas debajo de 1850 K.
- Para condiciones encontradas en las cámaras de combustión de las turbinas de gas, la formación de NO se incrementa linealmente con respecto a el tiempo.
- Para mezclas muy pobres, la formación de NO es independiente con respecto al tiempo de residencia.

En la **figura 2.10** están representadas las relaciones que guardan todas las emisiones anteriormente descritas. En la parte de mezcla pobre, los NOx y los óxidos de carbono (CO) son escasas, pero a diferencia, los hidrocarburos no quemados (UHC) son altas.

En la zona, donde la mezcla es estequiométrica, las emisiones por hidrocarburos no quemados (UCH) son bajas, las emisiones de óxidos de carbono continúan siendo relativamente bajas (CO) pero en cambio, las emisiones de NO_x están en su máximo nivel.

Del lado contrario, en la zona de mezcla rica, las emisiones de NO_x decrecen, pero en cambio, las emisiones tanto de CO y UCH son altas.

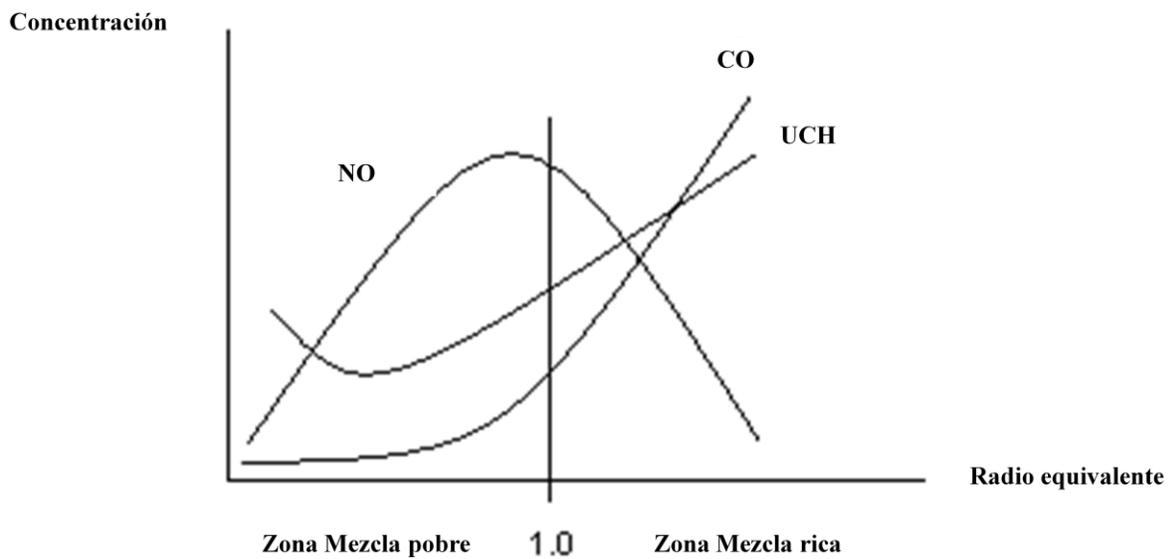


Figura 2.10 Emisiones de contaminantes respecto a la relación aire/combustible

Por lo anterior es que se han desarrollado sistemas como el DLN o el sistema de inyección de agua en una turbina, como medios para reducir las emisiones contaminantes, debido a que se puede notar la dificultad de tratar de reducir todas las emisiones con la única estrategia de variar la relación aire/combustible.

2.4 Cálculo de Combustión con Gas Natural.

Los componentes del gas natural varían con respecto a la zona de su extracción por lo que no se puede generalizar una composición única para todas las mezclas que existen. Se sabe que todos los tipos tienen como base el metano dictado por la relación CmHn. En México, una de tantas composiciones químicas para el gas natural es la siguiente:

Tabla 2.4 Composición química típica del Gas Natural Mexicano

Composición (% del volumen)	
H ₂ =	10.80%
CH ₄ =	76.30%
CO ₂ =	0.60%
C ₂ H ₄ =	2.30%
C ₂ H ₆ =	6.00%
C ₃ H ₆ =	0.70%
C ₃ H ₈ =	0.10%
C ₄ H ₄ =	3.20%
Total	100%

Existen varios métodos para calcular el exceso de aire en combustión, uno de los métodos es por medio del calor específico del combustible el cual se calcula como sigue:

La presencia de gases de combustión modifica dos parámetros muy importantes a la entrada de la turbina, como son entalpía y entropía. Para poder calcular los nuevos valores de la entalpía y entropía es necesario conocer primero el exceso de aire “ ” y el porcentaje de gases en el aire “x”.

$$\text{_____} \quad \text{_____} \quad [2.21]$$

$$\text{_____} \quad [2.22]$$

Para calcular los excesos de aire, lo primero que se calcula es el consumo total de combustible por medio de la siguiente fórmula.

$$\text{_____} \quad \text{_____} \quad \text{_____}$$

Donde H_u = calor específico del gas natural (44000 kJ/kg)

Una vez calculado el consumo total de combustible, ahora se calcula el consumo de combustible para posteriormente calcular los excesos de aire y los porcentos de los gases. Para ello tenemos que empezar calcular con el factor “B”, el cual es una relación entre el calor de ingreso y el poder calorífico del combustible

$$B = \frac{\text{Calor de ingreso}}{\text{Poder calorífico del combustible}}$$

Esto nos da como resultado, que de la mezcla de los gases de combustión y aire atmosférico el 34.38 % lo constituyen los gases de combustión y el exceso de aire es de 283.91%.

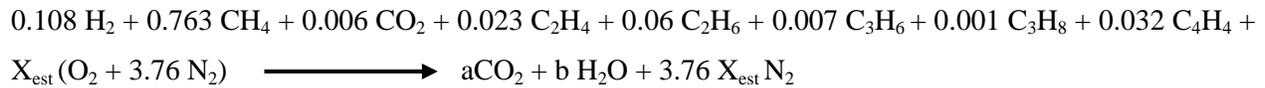
Otro método para calcular los excesos de aire en una cámara de combustión implica hacer un análisis de la composición química del gas natural incluida en la **tabla 2.4**. Se efectúa de la siguiente manera

En una base molar o volumétrica, el aire seco está compuesto por 20.9 por ciento de oxígeno, 78.1 por ciento de nitrógeno, 0.9 por ciento de argón y pequeñas cantidades de dióxido de carbono, helio, neón e hidrógeno. En el análisis de los procesos de combustión, el argón en el aire se trata como nitrógeno, en tanto que los gases que existen en cantidades muy pequeñas se descartan. De modo que el aire seco puede considerarse aproximadamente como 21 por ciento de oxígeno y 79 por ciento de nitrógeno en números molares. Por consiguiente cada mol de oxígeno que entra a una cámara de combustión será acompañado por $0.79/0.21 = 3.76$ mol de nitrógeno. Por ejemplo



Tome en cuenta que el nitrógeno se comporta como un gas inerte y no reacciona con otros elementos químicos más que para formar una pequeña cantidad de óxidos nítricos. El mayor impacto del nitrógeno dentro de una combustión se debe a que suele entrar a la cámara en grandes cantidades a una baja temperatura y salir a temperatura considerablemente altas, absorbiendo una gran cantidad de energía química liberada durante la combustión.

Por consiguiente, la reacción a la entrada de la cámara de combustión sería la siguiente, tomando en cuenta la composición química del gas natural y la composición química del aire



En donde, X_{est} , es la cantidad mínima de aire necesario para producir la combustión completa.

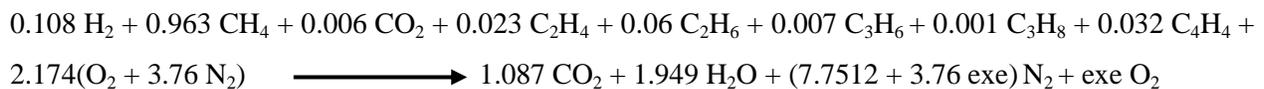
Obteniendo los coeficientes para los productos se calcula de la siguiente forma

$$\text{C:} \quad a = 0.763 + 0.006 + 2(0.023) + 2(0.06) + 3(0.007) + 3(0.001) + 4(0.032) = 1.087$$

$$\text{H:} \quad 2b = 2(0.108) + 4(0.763) + 4(0.023) + 6(0.06) + 6(0.007) + 8(0.001) + 4(0.032) = 3.898$$

$$2b = 3.898 \quad b = 1.949$$

$$\text{O:} \quad 2X_{\text{est}} = 2a + b \quad X_{\text{est}} = 2.0615$$



Con esta ecuación que se obtuvo posteriormente se calcula el exceso de aire necesario para alcanzar una temperatura específica después de la combustión. Al considerar un proceso de combustión completo, sin oxígeno excedente y que se efectúa en una cámara de combustión que opera adiabáticamente, la temperatura de los gases de combustión que resulta es la máxima temperatura que se puede lograr. A esta temperatura máxima es la que recibe el nombre de temperatura de flama adiabática.

Se parte de la ecuación

[2.23]

Substituyendo el primer término de la ecuación se obtiene

[2.24]

$$1.087 (h_{T3} - h_0) \text{ CO}_2 + 1.949 (h_{T3} - h_0) \text{ H}_2\text{O} + 7.7512 (h_{T3} - h_0) \text{ N}_2 + 3.76 \text{ exe} (h_{T3} - h_0) \text{ N}_2 + \text{exe} (h_{T3} - h_0) \text{ O}_2$$

Del Segundo término se obtiene

[2.25]

$$= 2.0615 (h_{T2} - h_0)O_2 + 7.7512(h_{T2} - h_0) N_2 + 3.76exe(h_{T3} - h_0) N_2 + exe(h_{T3} - h_0)O_2$$

Sustituyendo en la ecuación

$$2.0615(h_{T2} - h_0)O_2 + 7.7512 (h_{T2} - h_0)N_2 + 1.087(h_{T3} - h_0)CO_2 + 1.949(h_{T3} - h_0)H_2O + 7.7512(h_{T3} - h_0)N_2 + exe [-3.76(h_{T2} - h_0)N_2 - (h_{T2} - h_0)O_2 + 3.76(h_{T3} - h_0)N_2 + (h_{T3} - h_0)O_2]$$

Despejando el exceso de aire para alcanzar la temperatura (T_3) deseada

[2.26]

Con este exceso de aire la reacción final quedaría de la siguiente forma

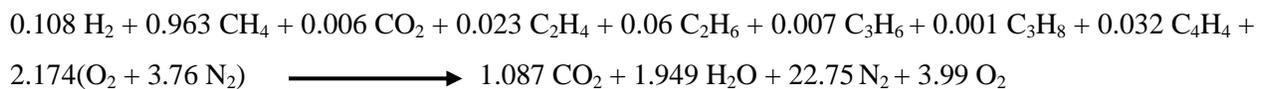


Tabla 2.5 *Peso molecular, fracción masa y mol de los componentes de los gases de escape del gas natural.*

Componente	Peso Molecular	Fracción Masa (z)	Fracción Mol (y)
CO ₂	44.01	0.0564	0.0365
H ₂ O	18.02	0.0414	0.0655
N ₂	28.01	0.7516	0.7640
O ₂	32	0.1506	0.1340

Para calcular la relación aire-combustible, partimos de la formula

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} = \frac{(NM)_{aire}}{(NM)_C + (NM)_{H_2}} \quad [2.27]$$

Y se va a requerir la masa molar del aire; $M = 28.97$ kg/kmol

Sustituyendo

Complementando el análisis, se incluye la **tabla 2.6** y como en la **figura 2.11**, las fracciones molares de los principales compuestos que resultan de la combustión del gas natural a relaciones de aire/combustible. Estos van desde $\Phi = 0.1$ hasta $\Phi = 2$

Como se sabe, la fracción molar es una unidad química para expresar la concentración de soluto en una disolución. Nos expresa la proporción en que se encuentran los moles de soluto con respecto a los moles totales de disolución.

Tabla 2.6 Fracciones molares de las principales emisiones variando la relación aire/combustible para el gas natural.

Φ	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
0.1	0.148	0.108	0.586	0.158
0.2	0.125	0.092	0.627	0.156
0.3	0.109	0.080	0.657	0.155
0.4	0.096	0.071	0.680	0.154
0.5	0.086	0.063	0.698	0.153
0.6	0.078	0.057	0.713	0.152
0.7	0.071	0.052	0.725	0.152
0.8	0.066	0.048	0.735	0.151
0.9	0.061	0.045	0.744	0.151
1	0.057	0.042	0.751	0.151
1.1	0.053	0.039	0.758	0.150
1.2	0.050	0.037	0.764	0.150
1.3	0.047	0.034	0.769	0.150
1.4	0.044	0.033	0.773	0.150
1.5	0.042	0.031	0.777	0.149
1.6	0.040	0.029	0.781	0.149
1.7	0.038	0.028	0.785	0.149
1.8	0.037	0.027	0.788	0.149
1.9	0.035	0.026	0.790	0.149
2	0.034	0.025	0.793	0.149

Como se puede revisar en la **figura 2.11**, el nitrógeno (N_2) sube con respecto al aumento de la relación aire/combustible, esto es atribuible a que la cantidad de aire que entra a la cámara de combustión es mayor, dando como resultado un aumento en la cantidad de nitrógeno disponible en la mezcla.

Por otro lado el Dióxido de carbono (CO_2) disminuye con referencia a la relación aire/combustible, esto es debido a que al aumentar el aire disponible, la cantidad porcentual de carbono proveniente del combustible disminuye. Recordando que estamos hablando de fracciones molares por lo tanto, al aumentar O_2 y N_2 el Carbono disminuye.

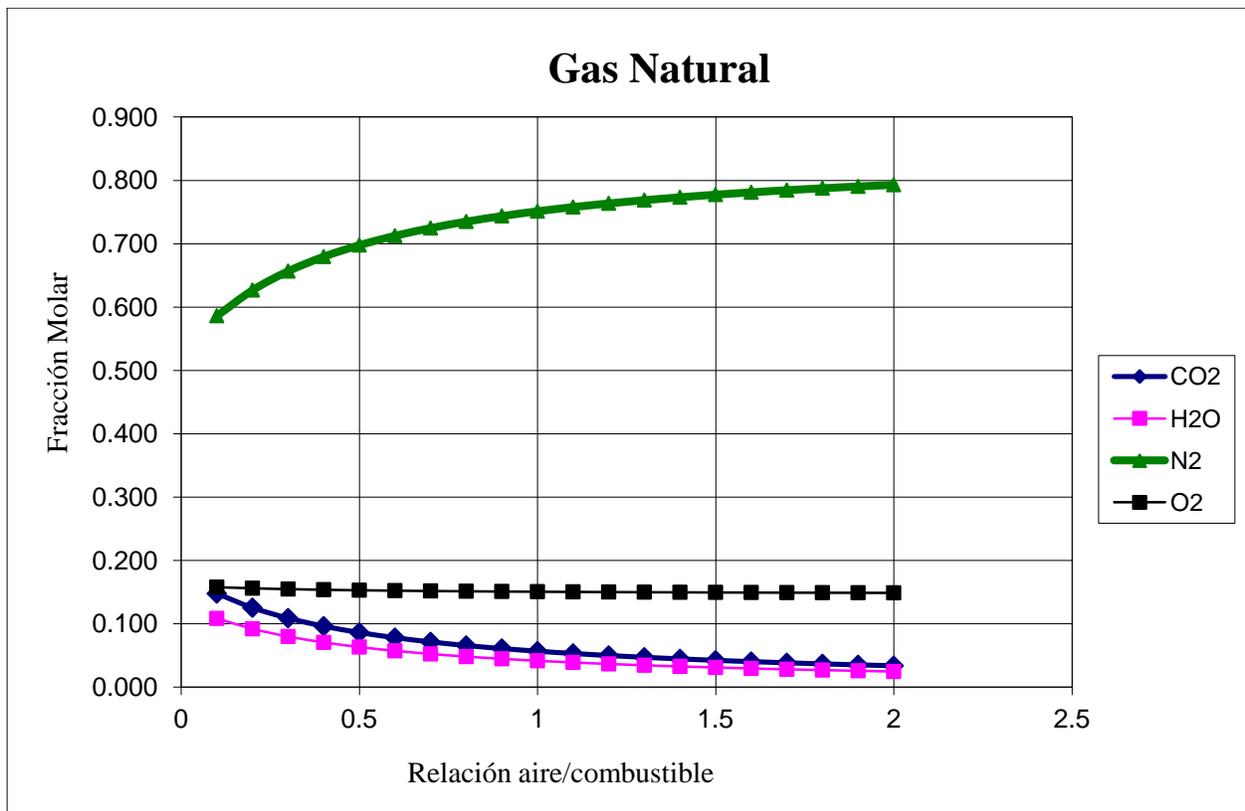


Figura 2.11 Fracciones molares de las principales emisiones variando la relación aire/combustible para el gas natural.

2.5 Cálculo de Combustión con Etanol.

En forma análoga, usando las formulas [2.21] y [2.22] se calculo el consumo total de combustible de la turbina usando etanol, para esto se recurre al poder calorífico que viene en la tabla 5.

$$\frac{\text{---}}{\text{---}} \text{---} \text{---}$$

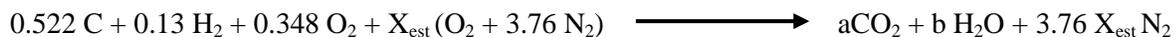
Donde H_u = calor específico del etanol (26946.71 kJ/kg)

Una vez calculado el consumo total de combustible, ahora se calcula el consumo de combustible para posteriormente calcular el exceso de aire y los porcentos de los gases

$$\frac{\text{---}}{\text{---}} \text{---} \text{---}$$

Esto nos da que en la mezcla de los gases de combustión y aire atmosférico el 55.25% lo constituyen los gases de combustión, el exceso de aire es de 173.84%.

Los datos de la composición del combustible quedarían como sigue:



En donde, X_{est} , es la cantidad mínima de aire necesario para producir la combustión completa.

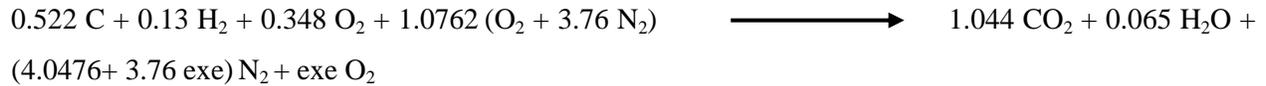
Obteniendo los coeficientes para los productos se calcula de la siguiente forma

$$\text{C: } a = 2(0.522) = 1.044$$

$$\text{H: } 2b = 0.13$$

$$2b = 0.13 \quad b = 0.065$$

$$O: \quad 2X_{est} = 2a + b \quad X_{est} = 1.0765$$



Con esta ecuación que se obtuvo se posteriormente se calcula el exceso de aire de igual manera que como se obtuvo para el gas natural, partiendo de la ecuación

$$1.044 (h_{T_3} - h_0) CO_2 + 0.065 (h_{T_3} - h_0) H_2O + 4.0476 (h_{T_3} - h_0) N_2 + 3.76 \text{ exe } (h_{T_3} - h_0) N_2 + \text{exe} (h_{T_3} - h_0) O_2$$

En el segundo término se obtiene

$$= 1.0765 (h_{T_2} - h_0) O_2 + 4.0475 (h_{T_2} - h_0) N_2 + 3.76 \text{ exe} (h_{T_3} - h_0) N_2 + \text{exe} (h_{T_3} - h_0) O_2$$

Substituyendo en la ecuación

$$1.0765 (h_{T_2} - h_0) O_2 + 4.0475 (h_{T_2} - h_0) N_2 + 1.044 (h_{T_3} - h_0) CO_2 + 0.065 (h_{T_3} - h_0) H_2O + 4.0476 (h_{T_3} - h_0) N_2 + \text{exe} [-3.76 (h_{T_2} - h_0) N_2 - (h_{T_2} - h_0) O_2 + 3.76 (h_{T_3} - h_0) N_2 + (h_{T_3} - h_0) O_2]$$

Despejando el exceso de aire para alcanzar la temperatura (T_3) deseada

Con este exceso de aire la ecuación final quedaría de la siguiente forma

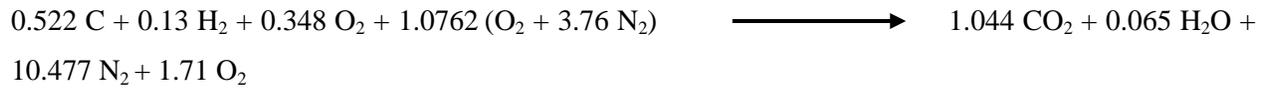


Tabla 2.7 *Peso molecular, fracción masa y mol de los componentes de los gases de escape del etanol.*

Componente	Peso Molecular	Fracción Masa (z)	Fracción Mol (y)
CO₂	44.01	0.1162	0.1175
H₂O	18.02	0.0030	0.2107
N₂	28.01	0.7424	2.4598
O₂	32	0.1384	0.4314

Se utiliza la misma fórmula anteriormente utilizada para calcular la relación aire combustible

Con la misma masa molar del aire; $M = 28.97 \text{ kg/kmol}$

Se sustituye

Las fracciones molares para el etanol quedaron incluidas en la **tabla 2.8** y **figura 2.12**

Tabla 2.8 Fracciones molares de las principales emisiones variando la relación aire/combustible para el etanol.

Φ	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
0.1	0.377	0.010	0.492	0.121
0.2	0.301	0.008	0.565	0.126
0.3	0.251	0.006	0.613	0.130
0.4	0.216	0.005	0.647	0.132
0.5	0.189	0.005	0.673	0.134
0.6	0.168	0.004	0.693	0.135
0.7	0.151	0.004	0.709	0.136
0.8	0.137	0.003	0.722	0.137
0.9	0.126	0.003	0.733	0.138
1	0.116	0.003	0.742	0.139
1.1	0.108	0.003	0.750	0.139
1.2	0.101	0.003	0.757	0.140
1.3	0.094	0.002	0.763	0.140
1.4	0.089	0.002	0.769	0.140
1.5	0.084	0.002	0.773	0.141
1.6	0.080	0.002	0.778	0.141
1.7	0.076	0.002	0.781	0.141
1.8	0.072	0.002	0.785	0.141
1.9	0.069	0.002	0.788	0.142
2	0.066	0.002	0.791	0.142

Algo semejante a lo obtenido en la **figura 2.11** se obtuvo en la **figura 2.12** para el etanol; el nitrógeno (N₂) aumenta con forme aumenta la relación aire/combustible, debido al aumento de la cantidad del aire que entra a la cámara de combustión.

El dióxido de carbono (CO₂) disminuye con respecto a la relación aire/combustible debido al aumento de Oxígeno y de nitrógeno.

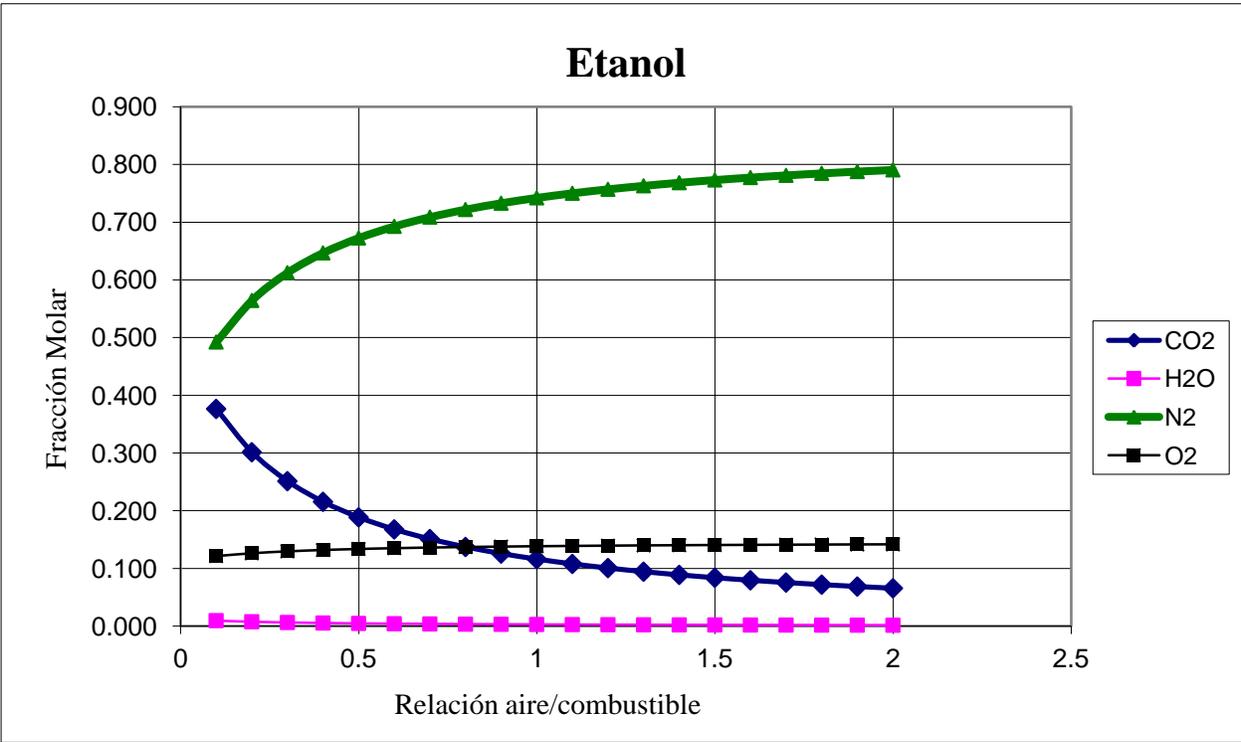


Figura 2.12 Fracciones molares de las principales emisiones variando la relación aire/combustible para el etanol.

Capítulo 3: COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Después de haber determinado las ecuaciones y calculados los ciclos tanto para gas natural como para etanol, se procede a realizar una comparación entre ambos combustibles. Para ello, se fijó una relación de compresión en el compresor de 12.2, lo que resulta en una temperatura a la salida del compresor (T_2) de 583.06 K a condiciones ISO - 15°C (288K) y una presión de 101.32 kPa. En los **Anexos A y B**, se encuentran plasmados los resultados para consumo de combustible para gas natural y etanol respectivamente para una turbina GE 61B.

Para crear la tabla se calculó primeramente los requerimientos de calor requerido en la cámara de combustión a diferentes temperaturas para ambos combustibles.

Se comparó para ambos combustibles usando la misma turbina (61B) y con los cálculos obtenidos, los cuales se encuentran resumidos en la **figura 3.1**, la temperatura a la salida del compresor (T_2) es de 583.06 K, obteniéndose los siguientes requerimientos de combustible para gas natural a diferentes temperaturas de la turbina.

Como se esperaba, conforme la temperatura requerida a la entrada de la turbina (T_3) va aumentando, el consumo de combustible que se requiere igualmente aumenta.

Se puede observar en la **figura 3.1** que hay un menor consumo de combustible cuando se utiliza Gas Natural de hasta un 38.76% en comparación con el etanol. Esta diferencia nace principalmente de la diferencia en el poder calorífico de ambos combustibles, el Gas natural al poseer una mayor cantidad de carbonos dentro de su composición haciendo que su poder calorífico aumente a diferencia de la del etanol en la que su cantidad de carbonos es menor.

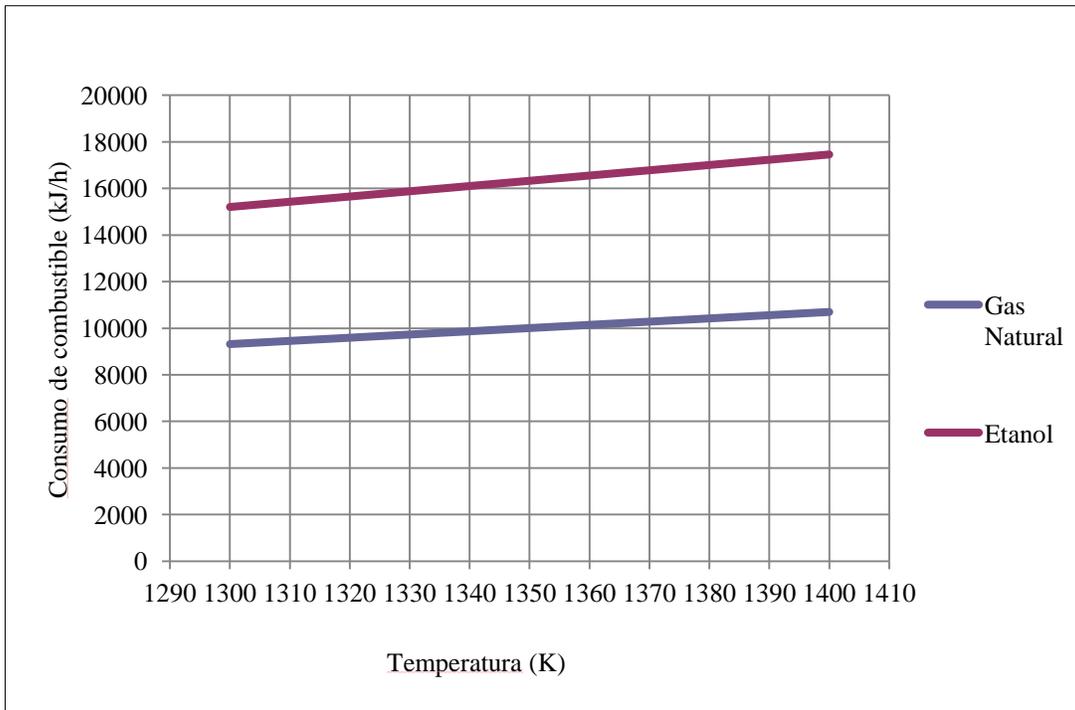


Figura 3.1 Consumo de combustible Etanol contra Gas natural.

Un dato importante a tomar en cuenta es ver cómo se comporta el exceso de aire para ambos combustibles a diferentes temperaturas. Entre mayor sea la temperatura de entrada a la turbina, el exceso de aire disminuye

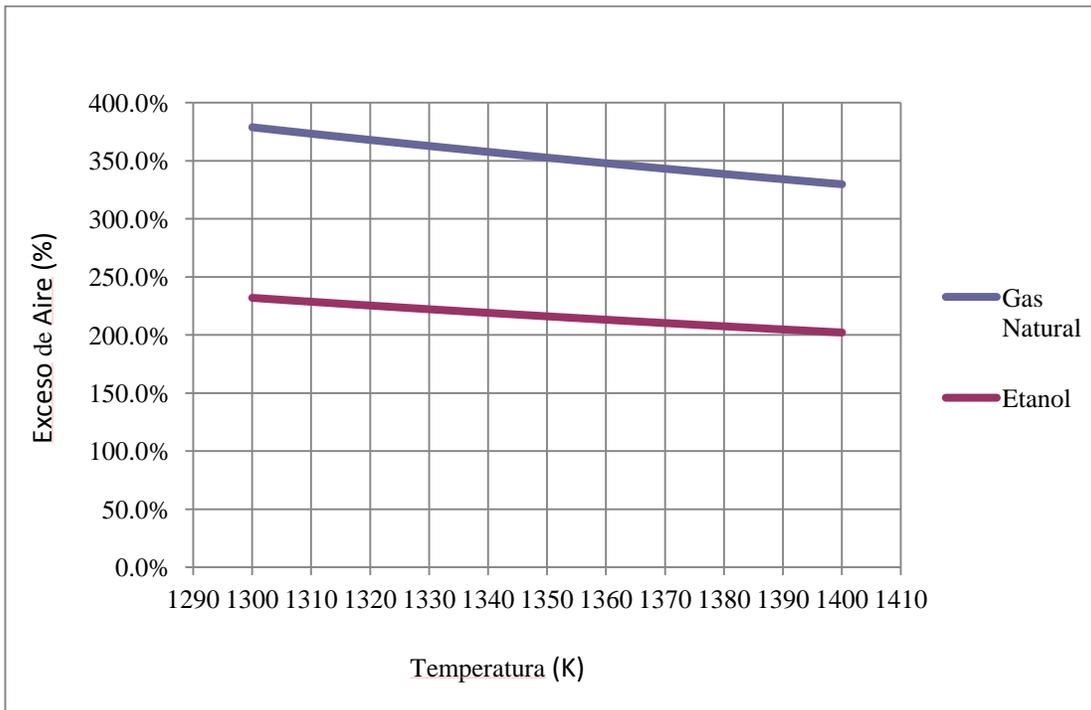


Figura 3.2 Excesos de aire para Etanol y Gas Natural.

De igual forma se compararon las emisiones de ambos combustibles, estas están representadas por sus fracciones molares para CO_2 , O_2 , N_2 y H_2O , los cuales son las principales emisiones de una turbina de gas.

En la **figura 3.3**, se observa la diferencia en emisiones entre el gas natural y el etanol, siendo esta última mayor. Revisando las **tablas 2.6 y 2.8** previamente incluidas. Si tomamos la relación estequiométrica ($\Phi = 1$), para el gas natural la fracción molar es de 0.057, mientras que para el etanol a la misma relación, encontramos que la fracción molar es 0.116, esto quiere decir que se está produciendo (teóricamente), mayores cantidades de CO_2 con el etanol que con el gas natural a una relación estequiométrica

En la **figura 3.4**, se observa la emisión de agua, siendo otra vez mayor la fracción molar que emite el gas natural a comparación del etanol. De igual forma, si tomamos la relación estequiométrica en ambos combustibles, para el gas natural es 0.042 mientras que para el etanol es 0.003.

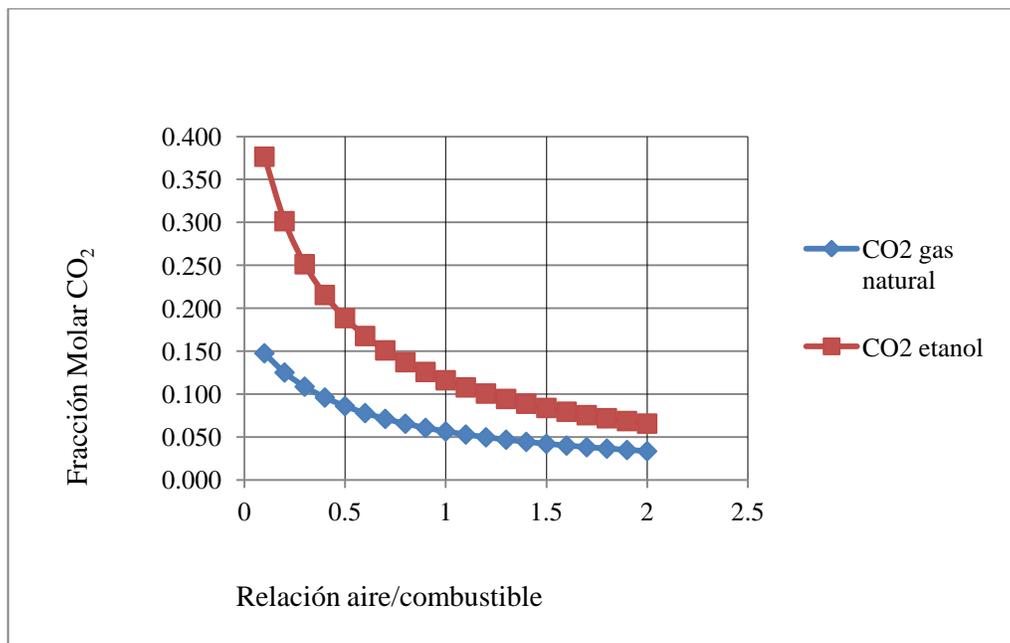


Figura 3.3 Comparación de la fracción molar del CO_2 para etanol y gas natural.

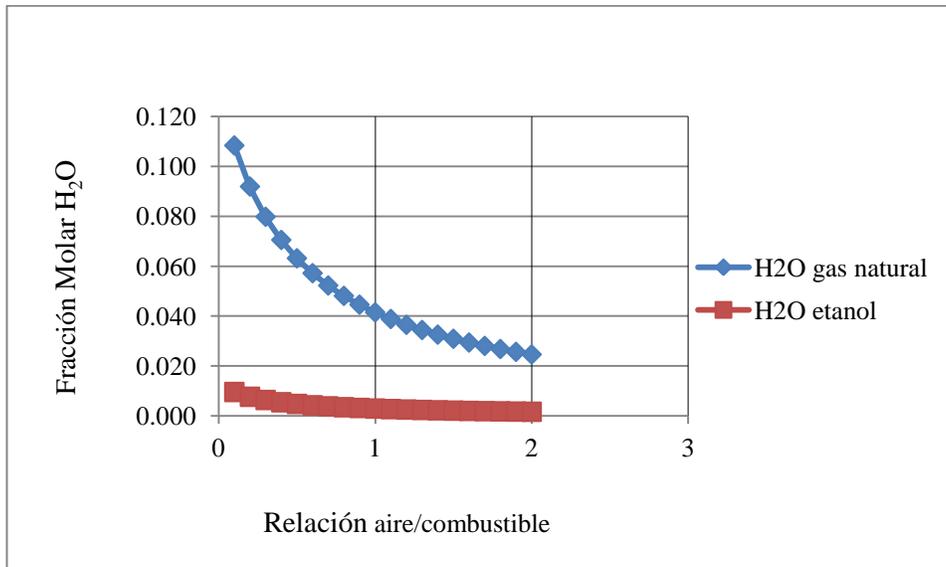


Figura 3.4 Comparación de la fracción molar del H₂O para etanol y gas natural.

En la **figura 3.5** se observa la relación molar del O₂ y del N₂ respectivamente. Siendo mayor las emisiones de O₂ para la relación estequiométrica para el gas natural 0.151 contra 0.139 del etanol

Para la **figura 3.6**, se observa la relación molar para N₂, correspondiendo 0.751 del gas natural contra 0.742, siendo ligeramente mayor las emisiones para el gas natural.

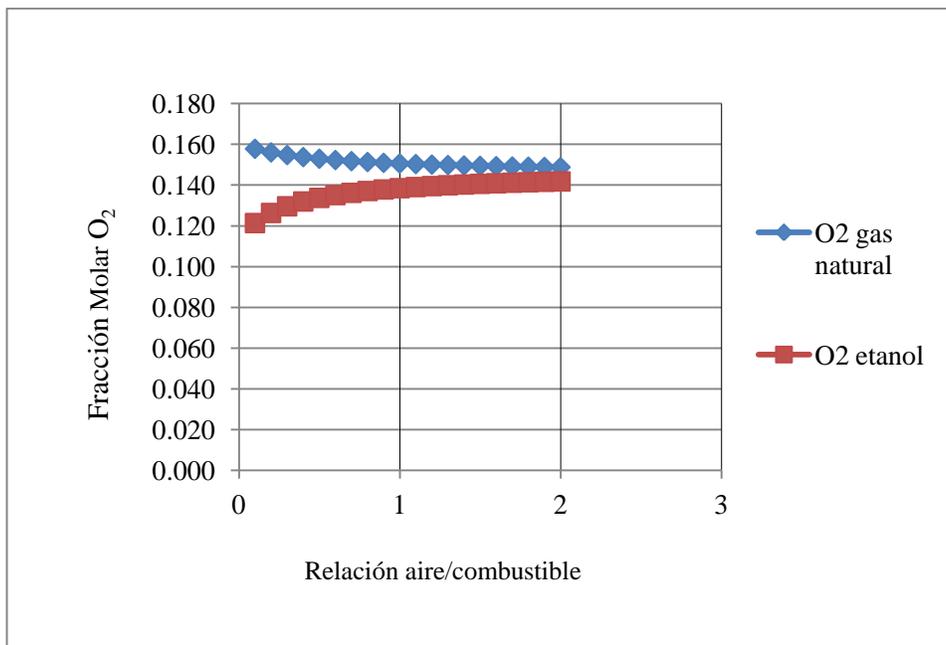


Figura 3.5 Comparación de la fracción molar del O₂ para etanol y gas natural.

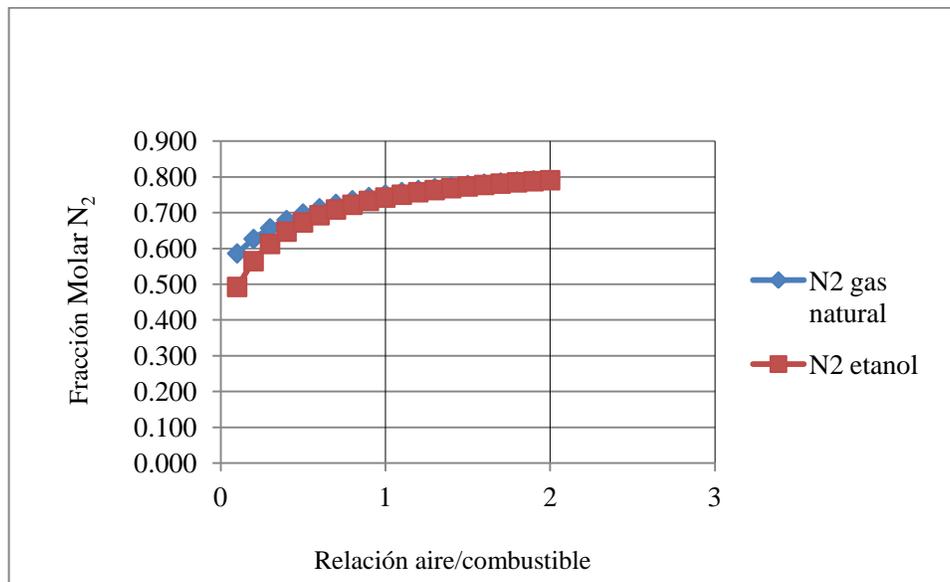


Figura 3.6 Comparación de la fracción molar del N₂ para etanol y gas natural.

No existe una solución única al problema energético del mundo, este debe contener una amplia gama de fuentes de energía, buscando siempre el menor impacto ambiental y la mayor sustentabilidad en un futuro.

Es por ello que se debe mejorar la tecnología actual para hacer más eficiente la obtención de energías renovables como el etanol, me parece que la principal pregunta no es si se puede utilizar el etanol en turbinas de gas, me parece que la pregunta debería de ser la de ¿Existe la disponibilidad necesaria de fuentes de energía en el mundo para hacerlas funcionar?

Para responder esa pregunta se deben de revisar temas socioeconómicos los cuales ya no involucran a la ingeniería térmica sino más bien es un complemento a esta. Temas tales como el impacto que puede resultar en la sociedad el sembrar para comer o sembrar para producir energía, ambos campos son vitales para un progreso sostenible y ambos se encuentran íntimamente relacionados con los procesos actuales de obtención de etanol, una solución compleja que involucra una mayor investigación en ambos rubros por separados pero a la vez en conjunto buscando siempre la mejor integración entre ambos sectores.

Es por ello, a la luz de estas circunstancias, se recomendaría el uso de turbinas de gas de menor tamaño para usar etanol, principalmente por su menor consumo

Para ilustrar mejor esta situación, se construyo la **tabla 3.1**, como se menciono en capítulos anteriores, se espera que se produzcan 100 GL a nivel mundial de etanol por año; significaría que entre 761 y 663 turbinas del tipo GE 61B, dependiendo de la temperatura T_3 , podrían utilizar etanol, lo que en promedio serian entre 48.21 Giga watts y 55.35 Giga watts, dependiendo claro está, de la temperatura de entrada de la turbina, a mayor T_3 mayor requerimiento de etanol.

Tabla 3.1 Consumo de Etanol por año para turbinas 61B.

T₃ (K)	Consumo de combustible (kJ/año)	Turbinas (61B)
1300	131389889.5	761
1310	133327212.2	750
1320	135264534.8	739
1330	137205929.2	729
1340	139147323.5	719
1350	141092789.6	709
1360	143038255.7	699
1370	144988607.8	690
1380	146938960	681
1390	148891755.1	672
1400	150844550.3	663

Entonces se pueden empezar a deducir que para el problema energético que hoy el mundo afronta no existe una solución única, debe ser un conjunto de soluciones, un balance entre el uso de energías renovables y no renovables, hasta que se encuentre una solución que pueda satisfacer nuestras crecientes demandas de energía.

También es de significativa importancia revisar el uso de etanol en una turbina de gas desde varias perspectivas con ventajas y desventajas:

Efectos ambientales.

Revisando las fracciones molares de ambos componentes, se puede llegar a concluir que no existe una diferencia notable en cuanto a emisiones por ambos combustibles, sus emisiones mayores son muy similares en ambos casos, sin embargo, dado que el gas natural es uno de los combustibles más "limpios", el etanol podría ser un buen sustituto del mismo. Se recomendaría hacer una medición más a fondo ya con datos reales para ver productos que son más complicados de medir tales como UHC, NO, NO₂, para los que la forma correcta es en un laboratorio.

Por otro lado se encuentra en mucha literatura que con el uso de etanol no aumenta la cantidad de CO₂ en el ambiente. ¿Qué quiere decir esto? Se dice que el etanol no produce CO₂, esto significa más bien que no aumenta el ya existente. Para decirlo en otras palabras, el CO₂ que produce el etanol es el mismo que el maíz o la caña de azúcar (o cualquier otra fuente natural) ya capturo en su momento cuando estaba realizando la fotosíntesis y por lo tanto es un mitigante en los gases de efecto invernadero. En realidad, no es tan cierta tal afirmación, esto es debido a que el CO₂ que la planta ya capturo, en realidad no hace daño

al medio ambiente y se encuentra contenida en la misma, pero al momento de quemar tal derivado, no se emite de la misma forma los CO₂, se emite un gas que hace daño al medio ambiente como cualquier otro combustible fósil, es por ello que no es una afirmación totalmente cierta.

Las dos principales ventajas del etanol sobre los combustibles derivados de los hidrocarburos serían; es un combustible renovable, tomando una mayor importancia al momento de ver que cada vez es más caro y difícil la obtención de hidrocarburos fósiles y la segunda ventaja es que al ser derivado de un ser vivo, no contiene sulfuros en su composición.

Seguridad Industrial.

En cuanto a su manejo, el etanol es miscible al agua, esto en especial toma importancia en cuanto al manejo de riesgos cuando se está dentro de una planta generadora, al ser soluble al agua puede ser fácilmente controlable en cualquier conato de incendio, mitigando los riesgos en su manejo.

Otro punto importante a tomar en cuenta es que si llegara a existir algún derrame de etanol, los efectos en el medio ambiente son bajos, al ser este biodegradable y también por su tendencia a evaporarse con rapidez a condiciones ambientales.

Almacenamiento.

El etanol se evapora rápidamente a condiciones ambiente, lo que puede representar un gran problema al momento de almacenarlo, debido a que debe ser sometido a condiciones en la cual su tasa de evaporación sea menor.

Esto también representa un problema para transportarlo, ya que se puede evaporar una gran cantidad al momento del mismo, pudiendo ser difícil pensar en un ducto el cual suele estar a diferentes presiones y temperaturas en su trayecto.

Otro dato a tener en cuenta es que el bio-etanol al ser biodegradable puede llegar a ser atacado por bacterias que pudieran existir en los contenedores de almacenaje, por lo que representaría un mayor control bacteriológico y una constante limpieza de los mismos.

Capacidad de mezclarse con otros combustibles.

Una valiosa propiedad de los biocombustibles es que pueden mezclarse con otros hidrocarburos, produciendo mezclas, sin sacrificar las propiedades de los hidrocarburos pero obteniendo la principal ventaja de los biocombustibles, esto es, en la reducción en la emisión de contaminantes.

Esto también conlleva una reducción en costos al ser mezclado con los hidrocarburos, tomando una mayor importancia cuando en los últimos años se ha observado un constante escalamiento en los precios de los hidrocarburos.

Modificación a la cámara de combustión.

Hablando del impacto dentro de la turbina de gas, es necesario realizar modificaciones a la cámara de combustión, principalmente por el alto contenido de oxígeno en el etanol, con el fin de mejorar el aprovechamiento y eficiencia; al existir más oxígeno dentro de la mezcla del combustible, el diseño de la cámara de combustión debería de ajustarse para no necesitar tanto oxígeno del compresor, a diferencia de los combustibles de fuentes fósiles.

También es necesario considerar la adecuación de la cámara de combustión para ajustar las áreas efectivas dentro de las mismas, debido al menor poder calorífico del etanol.

Por todo lo anterior es que se recomienda hacer un estudio mucho más detallado enfocado al diseño de una cámara de combustión usando etanol y revisando los puntos antes citados.

Corrosión de la maquinaria.

El etanol, al ser un derivado de un ser vivo, tiene la ventaja de no poseer sulfuro en su composición química, lo que lo hace más amigable con las partes de la turbina de gas al reducir la corrosión dentro de ella.

CONCLUSIONES.

- El etanol es una potencial fuente de energía que necesita ser desarrollada, el mundo apenas está volteando a verla como un medio de energía, sin embargo las perspectivas que se contemplan para su desarrollo y producción no parecieran ser suficientes, alrededor del 0.26% de crecimiento anual, a comparación del aumento en la demanda de energía que es de alrededor del 2.5% anual, es por ello que se debe de promover un mayor recurso a los biocombustibles para que sean una fuente que pudiera cubrir la demanda creada.
- Los biocombustibles son más amigables con el medio ambiente, debido a que son miscibles al agua y biodegradables. Esto toma mayor trascendencia cuando recordamos los daños al medio ambiente producto de los derrames ocurridos como el visto en el golfo de México en el 2010.
- El etanol cumple con los requisitos básicos de la cámara de combustión y puede ser usado para producir energía en una turbina de gas, aunque un ajuste en el diseño en la cámara de combustión es necesario para permitir un mayor volumen de etanol debido a su menor poder calorífico. Principalmente se recomienda el uso de etanol en turbinas de menor tamaño debido a la baja producción de etanol en el mundo.
- Y principalmente concluyo que el problema energético que enfrenta el mundo no es de una solución simple y requiere de un desarrollo integral de muchos sectores como el agrícola, industrial, tecnológico y social en los que deben estar involucrados tanto el sector publico como el privado.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.

1. Nag, Ahindra. *"Biofuels Refining and Performance"*, McGraw Hill, 2008.
2. Fessenden, Ralph. Fessenden, Joan. *"Química Orgánica"*, Grupo Editorial Iberoamérica, 1983.
3. Banco Interamericano de Desarrollo (BID), (S&T)² Consultants Inc, *"Biofuels in Latin American and the Caribbean"*, Septiembre, 2006.
4. Agencia Internacional de Energía, *"Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies"*. Consultado 9 de septiembre del 2010.
http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2005/Energy_Indicators_Web.pdf
5. International Energy Agency. (2009). *"World Energy Outlook"*. Consultado 9 de septiembre del 2010. http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/WEO2009_es_spanish.pdf
6. Energy Information Administration, *"Energy Perspectives"*. Consultado 9 de septiembre del 2010 http://www.eia.doe.gov/aer/ep/ep_frame.html
7. Enkerlin, Ernesto. Cano, Gerónimo. Garza, Raúl. *"Ciencia Ambiental y Desarrollo Sostenible"*, International Thomson Editores, 1997.
8. Cheng, Wu-Hsun. Kung, Harold. *"Methanol, production and use"*, MARCEL DEKKER, 1994
9. Cengel, Yunus, Boles, Michael, *"Termodinámica"*, Sexta edición, MacGraw Hill, 2009
10. Campos, Eduardo de María. *"Fundamentos de turbinas de gas y vapor"*, ESIME – Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, Instituto Politécnico nacional, 1988
11. Toledo, Miguel. *"Tratado de Turbinas de gas y sus Aplicaciones; Teoría y Cálculo de ejemplos prácticos"*, – Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, Instituto Politécnico nacional, 2007.
12. HHH Saravanamutto, HHH. GFC Rorers, H Cohen; *"Gas Turbine Theory"*, Quinta Edición, Prentice Hall, 2001
13. Glassman, Irving. Yetter, Richard A. *"Combustion"*, Fourth Edition, Academic Press, 2008.
14. Lefebvre, Arthur. Ballal, Dilip. *"Gas Turbine Combustion"*, Third Edition, CRC Press, 2010.
15. Pemex, *"El Diesel"*. Consultado 9 de septiembre del 2010.
<http://www.ref.pemex.com/octanaje/24DIESEL.htm>
16. The Engineering Tool Box. *"Alternative Fuels Properties"*. Consultado 9 de septiembre del 2010
http://www.engineeringtoolbox.com/alternative-fuels-d_1221.html
17. Proquimsa, *"Hoja de seguridad"*. Consultado 9 de septiembre del 2010.
http://www.proquimsaec.com/PDF/HojaSeguridad/HS_Etanol.pdf
18. U.S Department of Energy. *"Properties Fuels"*. Consultado 9 de septiembre del 2010
<http://www.afdc.energy.gov/afdc/pdfs/fueltable.pdf>

19. Organización de las Naciones Unidas, (2007) “*Energía para el desarrollo sostenible*”, Consultado el 9 de septiembre del 2010.
http://www.un.org/esa/sustdev/csd/csd14/bgrounder_energyfords_sp.pdf
20. General electric, “MS6001B Gas turbine”, Consultado 9 de septiembre del 2010
http://www.gepower.com/prod_serv/products/gas_turbines_cc/en/midrange/ms6001b.htm

ANEXO A. Consumo de combustible para Gas Natural

T_2 (K)	T_3 (K)	Q_{in} kJ/s	Consumo de combustible (kJ/h)
583.06	1300	113828.6153	9313.250343
583.06	1301	113996.4538	9326.98258
583.06	1302	114164.2922	9340.714816
583.06	1303	114332.1307	9354.447053
583.06	1304	114499.9691	9368.17929
583.06	1305	114667.8076	9381.911527
583.06	1306	114835.646	9395.643764
583.06	1307	115003.4845	9409.376
583.06	1308	115171.3229	9423.108237
583.06	1309	115339.1614	9436.840474
583.06	1310	115506.9998	9450.572711
583.06	1311	115674.8383	9464.304948
583.06	1312	115842.6767	9478.037185
583.06	1313	116010.5152	9491.769421
583.06	1314	116178.3536	9505.501658
583.06	1315	116346.1921	9519.233895
583.06	1316	116514.0305	9532.966132
583.06	1317	116681.869	9546.698369
583.06	1318	116849.7074	9560.430605
583.06	1319	117017.5459	9574.162842
583.06	1320	117185.3843	9587.895079
583.06	1321	117353.5755	9601.656177
583.06	1322	117521.7667	9615.417275
583.06	1323	117689.9579	9629.178374
583.06	1324	117858.1491	9642.939472
583.06	1325	118026.3403	9656.70057
583.06	1326	118194.5315	9670.461668
583.06	1327	118362.7227	9684.222766
583.06	1328	118530.9139	9697.983865
583.06	1329	118699.1051	9711.744963
583.06	1330	118867.2963	9725.506061
583.06	1331	119035.4875	9739.267159
583.06	1332	119203.6787	9753.028257
583.06	1333	119371.8699	9766.789355
583.06	1334	119540.0611	9780.550454
583.06	1335	119708.2523	9794.311552
583.06	1336	119876.4435	9808.07265
583.06	1337	120044.6347	9821.833748
583.06	1338	120212.8259	9835.594846
583.06	1339	120381.0171	9849.355945

583.06	1340	120549.2083	9863.117043
583.06	1341	120717.7523	9876.907002
583.06	1342	120886.2962	9890.696962
583.06	1343	121054.8402	9904.486921
583.06	1344	121223.3841	9918.276881
583.06	1345	121391.9281	9932.06684
583.06	1346	121560.472	9945.8568
583.06	1347	121729.016	9959.64676
583.06	1348	121897.5599	9973.436719
583.06	1349	122066.1039	9987.226679
583.06	1350	122234.6478	10001.01664
583.06	1351	122403.1918	10014.8066
583.06	1352	122571.7357	10028.59656
583.06	1353	122740.2797	10042.38652
583.06	1354	122908.8236	10056.17648
583.06	1355	123077.3676	10069.96644
583.06	1356	123245.9115	10083.7564
583.06	1357	123414.4555	10097.54636
583.06	1358	123582.9994	10111.33631
583.06	1359	123751.5434	10125.12627
583.06	1360	123920.0873	10138.91623
583.06	1361	124089.0546	10152.74083
583.06	1362	124258.0218	10166.56542
583.06	1363	124426.9891	10180.39001
583.06	1364	124595.9563	10194.21461
583.06	1365	124764.9236	10208.0392
583.06	1366	124933.8908	10221.86379
583.06	1367	125102.8581	10235.68839
583.06	1368	125271.8253	10249.51298
583.06	1369	125440.7926	10263.33757
583.06	1370	125609.7598	10277.16217
583.06	1371	125778.7271	10290.98676
583.06	1372	125947.6943	10304.81135
583.06	1373	126116.6616	10318.63595
583.06	1374	126285.6288	10332.46054
583.06	1375	126454.5961	10346.28513
583.06	1376	126623.5633	10360.10972
583.06	1377	126792.5306	10373.93432
583.06	1378	126961.4978	10387.75891
583.06	1379	127130.4651	10401.5835
583.06	1380	127299.4323	10415.4081
583.06	1381	127470.1633	10429.377
583.06	1382	127640.8943	10443.3459
583.06	1383	127811.6253	10457.3148

583.06	1384	127982.3563	10471.2837
583.06	1385	128153.0873	10485.2526
583.06	1386	128323.8183	10499.2215
583.06	1387	128494.5493	10513.1904
583.06	1388	128665.2803	10527.1593
583.06	1389	128820.3745	10539.84882
583.06	1390	128991.2213	10553.8272
583.06	1391	129162.0681	10567.80557
583.06	1392	129332.915	10581.78395
583.06	1393	129503.7618	10595.76233
583.06	1394	129674.6086	10609.7407
583.06	1395	129845.4554	10623.71908
583.06	1396	130016.3023	10637.69746
583.06	1397	130187.1491	10651.67584
583.06	1398	130357.9959	10665.65421
583.06	1399	130512.029	10678.25692
583.06	1400	130683.0103	10692.2463

ANEXO B. *Consumo de combustible para Etanol.*

T₂ (K)	T₃ (K)	Q_{in} kJ/s	Consumo de combustible (kJ/h)
583.06	1300	113828.6153	15207.16314
583.06	1301	113996.4538	15229.58586
583.06	1302	114164.2922	15252.00857
583.06	1303	114332.1307	15274.43129
583.06	1304	114499.9691	15296.854
583.06	1305	114667.8076	15319.27672
583.06	1306	114835.646	15341.69944
583.06	1307	115003.4845	15364.12215
583.06	1308	115171.3229	15386.54487
583.06	1309	115339.1614	15408.96758
583.06	1310	115506.9998	15431.3903
583.06	1311	115674.8383	15453.81301
583.06	1312	115842.6767	15476.23573
583.06	1313	116010.5152	15498.65845
583.06	1314	116178.3536	15521.08116
583.06	1315	116346.1921	15543.50388
583.06	1316	116514.0305	15565.92659
583.06	1317	116681.869	15588.34931
583.06	1318	116849.7074	15610.77203
583.06	1319	117017.5459	15633.19474
583.06	1320	117185.3843	15655.61746
583.06	1321	117353.2228	15678.04017
583.06	1322	117521.0612	15700.46289
583.06	1323	117688.8997	15722.8856
583.06	1324	117856.7381	15745.30832
583.06	1325	118024.5766	15767.73104
583.06	1326	118192.415	15790.15375
583.06	1327	118360.2535	15812.57647
583.06	1328	118528.0919	15834.99918
583.06	1329	118699.1051	15857.84604
583.06	1330	118867.2963	15880.31588
583.06	1331	119035.4875	15902.78572
583.06	1332	119203.6787	15925.25556
583.06	1333	119371.8699	15947.7254
583.06	1334	119540.0611	15970.19525
583.06	1335	119708.2523	15992.66509
583.06	1336	119876.4435	16015.13493
583.06	1337	120044.6347	16037.60477
583.06	1338	120212.8259	16060.07462
583.06	1339	120381.0171	16082.54446

583.06	1340	120549.2083	16105.0143
583.06	1341	120717.7523	16127.53127
583.06	1342	120886.2962	16150.04824
583.06	1343	121054.8402	16172.56521
583.06	1344	121223.3841	16195.08217
583.06	1345	121391.9281	16217.59914
583.06	1346	121560.472	16240.11611
583.06	1347	121729.016	16262.63308
583.06	1348	121897.5599	16285.15005
583.06	1349	122066.1039	16307.66702
583.06	1350	122234.6478	16330.18398
583.06	1351	122403.1918	16352.70095
583.06	1352	122571.7357	16375.21792
583.06	1353	122740.2797	16397.73489
583.06	1354	122908.8236	16420.25186
583.06	1355	123077.3676	16442.76883
583.06	1356	123245.9115	16465.2858
583.06	1357	123414.4555	16487.80276
583.06	1358	123582.9994	16510.31973
583.06	1359	123751.5434	16532.8367
583.06	1360	123920.0873	16555.35367
583.06	1361	124090.9594	16578.18167
583.06	1362	124259.715	16600.72692
583.06	1363	124428.4706	16623.27216
583.06	1364	124597.2262	16645.8174
583.06	1365	124765.9818	16668.36265
583.06	1366	124934.7374	16690.90789
583.06	1367	125103.493	16713.45314
583.06	1368	125272.2486	16735.99838
583.06	1369	125441.0042	16758.54363
583.06	1370	125609.7598	16781.08887
583.06	1371	125778.5154	16803.63411
583.06	1372	125947.271	16826.17936
583.06	1373	126116.0266	16848.7246
583.06	1374	126284.7822	16871.26985
583.06	1375	126453.5378	16893.81509
583.06	1376	126622.2934	16916.36034
583.06	1377	126791.049	16938.90558
583.06	1378	126959.8046	16961.45082
583.06	1379	127128.5602	16983.99607
583.06	1380	127299.4323	17006.82407
583.06	1381	127468.6112	17029.42587
583.06	1382	127637.7901	17052.02766
583.06	1383	127806.969	17074.62946

583.06	1384	127976.1479	17097.23126
583.06	1385	128145.3268	17119.83305
583.06	1386	128314.5057	17142.43485
583.06	1387	128483.6846	17165.03664
583.06	1388	128652.8635	17187.63844
583.06	1389	128822.0424	17210.24023
583.06	1390	128991.2213	17232.84203
583.06	1391	129160.4002	17255.44383
583.06	1392	129329.5791	17278.04562
583.06	1393	129498.758	17300.64742
583.06	1394	129667.9369	17323.24921
583.06	1395	129837.1158	17345.85101
583.06	1396	130006.2947	17368.45281
583.06	1397	130175.4736	17391.0546
583.06	1398	130344.6525	17413.6564
583.06	1399	130513.8314	17436.25819
583.06	1400	130683.0103	17458.85999