

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“GAS NATURAL – VENTAJAS TÉCNICAS, AMBIENTALES Y
ECONÓMICAS COMO COMBUSTIBLE EN CALDERAS
INDUSTRIALES ”**

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO QUÍMICO**

**POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE
CONOCIMIENTOS**

**PRESENTADO POR:
JESSICA JUDITH QUIROZ GONZALES**

LIMA – PERU

2004

ÍNDICE

Resumen	1
I. Introducción	2
II. Desarrollo de Conceptos Generales	3
2.1 Calderas Industriales	
2.1.1 Definición	3
2.1.2 Clasificación de los Calderos	4
2.2 Principios de Combustión	5
2.2.1 Definición de Combustión	5
2.2.2 Tipos de Combustibles	7
2.2.2.1 Combustibles Sólidos	8
2.2.2.2 Combustibles Líquidos	10
2.2.2.3 Combustibles Gaseosos	14
2.2.3 Tipos de Combustión	17
2.2.3.1 Combustión Perfecta	17
2.2.3.2 Combustión Completa con exceso de aire	18
2.2.3.3 Combustión Incompleta con defecto de aire	19
2.2.3.4 Combustión Imperfecta	20
2.3 Gas Natural	22
2.3.1 ¿Qué es el Gas Natural?	22
2.3.2 Origen	25
2.3.3 Historia del Gas Natural	26
2.3.4 Características	28
2.3.5 Usos del Gas Natural	29
2.4 Conceptos Básicos de Contaminación Ambiental	34
2.4.1 Contaminación Ambiental	34

2.4.2 La Combustión como generador de Contaminación Atmosférica	36
2.4.3 Calentamiento Global o Efecto Invernadero	37
2.4.4 Lluvia Ácida	38
III. Desarrollo del Tema	41
3.1 Objetivos	41
3.2 Ventajas del Gas Natural	47
3.2.1 Ventajas Técnicas	47
3.2.2 Ventajas Ambientales	48
3.2.3 Ventajas Económicas	54
3.2.3.1 Por uso del Gas Natural en razón a sus Propiedades	54
a) Costos de Operación	55
b) Costos de Mantenimiento	58
c) Costo por Manejo de Inventario de Combustibles Líquidos	59
d) Costo por Monitoreo Ambiental	60
3.2.3.2 Por uso del Gas Natural en razón a su Precio	61
IV. Conclusiones y Recomendaciones	66
V. Bibliografía.	68
VI. Apéndice	70
VII. Lista de Tablas y Figuras	71

RESUMEN

El gas natural constituye en la era actual la fuente de energía que ofrece las mayores ventajas por ser un combustible limpio, de bajo costo, cuyo uso industrial se adapta a las necesidades modernas y por lo tanto ofrece, a los países que lo poseen, una ventaja competitiva.

Este informe desarrolla las ventajas que presenta el uso del gas natural como combustible industrial y se han considerado tres tipos de ventajas: técnicas, ambientales y económicas. Como ventajas técnicas se encuentran las características que el Gas Natural presenta y que lo hacen de fácil manejo, de combustión más limpia, de rápida dispersión de las pérdidas, entre otros; como ventajas ambientales tenemos: la baja emisión de contaminantes en su combustión, la eliminación del tratamiento de efluentes de los productos de la quema, entre otros; respecto a las ventajas económicas se encuentra dividido en dos ítems: el primero por uso del gas natural en razón de sus propiedades (reduce costos de: operación, mantenimiento, etc.), y el segundo por uso del gas natural en razón a su precio (costo bastante competitivo con otras alternativas como el Diesel, GLP, etc.).

En realidad, para un país que posee reservas de gas natural, lo importante es impulsar su propio desarrollo obteniendo el mayor valor agregado posible. Sin energía es casi imposible convertir las materias primas en productos terminados que puedan competir en esta era global. Cuando se cuenta con una materia prima, es indispensable disponer de energía barata que permita convertirla en un producto terminado, con muchas ventajas adicionales sobre otras fuentes de energía.

Por todo lo anterior, el gas natural es la única energía, hasta ahora, que puede hacer compatible el progreso económico e industrial con la preservación del medio ambiente.

I. Introducción

Por más de un siglo el gas fue considerado como un sub producto del petróleo, pero este concepto ya ha cambiado y hay más de 70 países en el mundo *productores de gas natural*, que lo utilizan para su desarrollo industrial y logran así una mayor competitividad debido a un costo menor de la energía, con plantas térmicas generadoras de electricidad y la utilización directa del gas natural como insumo o como una fuente de calor limpia, en la industria.

La combustión del gas natural usada en la generación de electricidad, calderas industriales y otras aplicaciones, emite niveles más bajos de óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO₂); no emite partículas y virtualmente ningún dióxido de azufre (SO₂). El gas natural posee una amplia gama de aplicaciones, que permite reemplazar eficientemente a otros combustibles (los cuales emiten niveles significativamente más altos de estos contaminantes) en prácticamente cualquier tipo de proceso.

El consumo de gas natural va en aumento, tanto para la industria como para usos domésticos de calefacción y cocina, pues presenta una combustión muy limpia, sin desprendimiento de humo ni de residuos sólidos.

El suministro y la utilización del gas natural aportan beneficios medioambientales considerables en comparación con otros combustibles fósiles. El uso del gas natural puede contribuir a la mejora de la calidad del aire, a la lucha contra la lluvia ácida y a cambiar la tendencia de aumento potencial del efecto invernadero, considerado en la actualidad como el problema medioambiental más serio a nivel mundial.

II. Desarrollo de Conceptos Generales

2.1 Calderas Industriales

2.1.1 Definición

Las calderas son equipos diseñados para transferir calor producido por combustión, o mediante electricidad, a un fluido determinado.

Se emplean para producir agua caliente, vapor saturado, vapor sobrecalentado o calentar aceite térmico.

Partes de un Caldero: Los calderos, exceptuando los eléctricos, tienen 6 partes básicas:

- *Quemador:* Aporta el combustible y el aire de combustión (comburente), los mezcla y produce la combustión. Sus características dependen del combustible, debiendo disponer de los mecanismos de regulación que permitan formar una llama adecuada al hogar o cámara de combustión.
- *Cámara de Combustión:* También llamado hogar, es el espacio donde se aloja la llama, es decir, se produce la combustión y se transfiere calor por radiación.
- *Sección de Convección:* Zona donde se transfiere el calor de los gases de combustión al fluido a través de las superficies de calefacción (tubos).
- *Chimenea:* Zona por donde se eliminan los gases de combustión después de transferir calor al fluido, permitiendo regular el tiro.
- *Ventiladores de aire:* Proporcionan el aire de combustión y lo impulsan a través del caldero. En equipos grandes puede requerirse un ventilador exhaustor para tiro inducido.
- *Instrumentaciones y Controles:* Permiten efectuar la operación con la mayor seguridad y alcanzar mayores niveles de eficiencia.

2.1.2 Clasificación de los Calderos

Los calderos se clasifican según diferentes criterios relacionados con la disposición de los fluidos y su circulación, el mecanismo de transmisión de calor dominante, el tipo de combustible empleado, la presión de trabajo, el tiro, el modo de operación y parámetros exteriores al caldero ligados a la implantación, ubicación, lugar de montaje y aspectos estructurales.

a) Por la disposición de los fluidos:

- De tubos de agua (acuotubulares).
- De tubos de humo (pirotubulares).

b) Por la circulación de agua:

- De circulación natural.
- De circulación asistida.
- De circulación forzada.

c) Por el mecanismo de transmisión de calor:

- De convección,
- De radiación,
- De convección y radiación.

d) Por el combustible empleado:

- De carbón mineral,
- De combustibles líquidos,
- De combustibles gaseosos.
- De combustibles especiales (leña, bagazo, etc.)
- Mixtos.

e) Por la presión de trabajo:

- De baja presión $p < 20 \text{ kg/cm}^2$
- De media presión $20 < p < 64 \text{ kg/cm}^2$
- De alta presión $p > 64 \text{ kg/cm}^2$

f) Por el tiro:

- De tiro manual,
- De tiro forzado,
- De tiro inducido.

Aquí en el Perú el tipo de caldera predominante es el piro-tubular. En las calderas piro-tubulares los gases calientes de la combustión pasan a través de los tubos mientras el agua que circula alrededor de ellos es calentada.

Una de las fuentes más importantes de emisión de gases en el Perú, son las calderas. Su situación es la siguiente:

- Aproximadamente el 60% de las empresas industriales de Lima tienen una caldera de vapor.
- El tipo de caldera predominante es el piro-tubular de 50 a 800 BHP.
- La antigüedad de la mayoría de calderas está entre 10 a 50 años.
- Las potencias más frecuentes son de 200 a 300 BHP.
- Los combustibles más utilizados son: Diesel 2, Residual 6 y el Residual 500.
- El rango de eficiencia de combustión a la que actualmente están operando el mayor porcentaje de calderas es: < 60 – 90 >%.

2.2 Principios de Combustión

2.2.1 Definición de Combustión

Se entiende por combustión, la combinación química violenta del oxígeno (o comburente) con determinados cuerpos llamados combustibles, que se produce con notable desprendimiento de calor y formación de llama.

Para que se produzca la combustión, las 3 condiciones ya nombradas deben cumplirse, es decir que sea: una combinación química, que sea violenta y que produzca desprendimiento de calor.

Analizaremos una por una:

1) Debe existir combinación química, los productos finales una vez producida la combustión debe ser químicamente distintos a los productos iniciales.

Ej: Antes de producirse la combustión tenemos combustible y oxígeno. Producida la combustión ya no tenemos combustible y oxígeno mezclado, sino gases de combustión.

2) La combinación química debe producirse violenta e instantáneamente.

Ej: Una lámina de hierro colocada en la intemperie se va a oxidar lentamente, luego de cierto tiempo al combinarse con el oxígeno del aire. Pero esto no es combustión sino oxidación, porque el desprendimiento de calor se produce muy lentamente después de un tiempo.

3) Debe presentarse un desprendimiento de calor, se debe liberar cierta cantidad de calor.

El avance de la combustión ocurre por reacciones rápidas en cadena, que se sucede en etapas, las cuales dependen del tipo de combustible que se utilice, ya sea gas, líquido o sólido. También es necesario que la temperatura en algún punto de la mezcla de oxígeno y combustible adquiera un determinado valor.

La buena combustión está comprendida dentro de dos valores límites definidos, y son: límite inferior de inflamación que se produce cuando falta combustible, y límite superior de inflamación que es cuando falta oxígeno.

Los combustibles de uso industrial son elementos que se utilizan para la producción de calor. Están constituidos principalmente por carbono e hidrógeno, que al combinarse con el oxígeno combustionan, desprendiendo calor.

El carbono es el elemento que constituye el mayor porcentaje volumétrico del combustible, constituyendo el 80 a 90 % volumen del mismo. El carbono no arde directamente, sino que en el fenómeno de combustión es llevado a su estado gaseoso. El hidrógeno constituye el 5 o 6 % de los combustibles sólidos y del 8 al 15 % de los líquidos. En el combustible también se puede encontrar el azufre, generalmente desde 0.5 % en combustibles líquidos hasta 1 o 1.5 % en carbones, y el nitrógeno (en carbones) de 0.7 hasta 9.3 %.

Debido a que cada tipo de combustible requiere particular manejo y que combustiona a diferentes velocidades, se exige apropiado diseño (asociación: cámara de combustión – quemador) para un sistema de combustión eficiente, económico y

limpio. Claramente, las propiedades del combustible están relacionadas con los requerimientos del diseño del sistema.

La ingeniería de la combustión, es un elemento clave, necesaria para entender y tratar de resolver el asunto de la contaminación del medio ambiente. Mejorar el proceso de combustión requiere la habilidad para oxidar ciertos combustibles, (tales como compuestos hidrocarburos, gas natural, carbón, etc.); esto mejora las características de transformación de energía de las máquinas, reduce el consumo de combustible y produce emisiones más limpias.

La combustión puede tener uno o varios de los siguientes objetivos:

- Generar una determinada cantidad de calor para un proceso,
- Obtener una elevada temperatura para lograr el avance o la realización de un proceso,
- Obtener una atmósfera con los productos de combustión, y
- Producir una elevada presión por la generación de gases de los combustibles o líquidos que se calientan.

2.2.2 Tipos de Combustibles

Se designa con el nombre de combustibles a todos aquellos cuerpos que arden y en su reacción producen calor y llama. Un combustible puede ser considerado como un recurso finito de energía química potencial en el que la energía está almacenada en la estructura molecular de un componente en particular y esta energía es liberada por medio de unas complejas reacciones químicas.

Algunos de los requerimientos básicos de un combustible incluyen:

- Alta densidad de energía (contenido)
- Alto calor de combustión (liberar)
- Buena estabilidad térmica (calentamiento)
- Baja presión de vapor (volatilidad)
- No tóxico (impacto ambiental)

Diferentes tipos de combustibles son utilizados industrialmente en los procesos de combustión. Su selección depende de múltiples factores como son su costo, su disponibilidad en el mercado, su transporte, la reglamentación ambiental, entre otros.

A continuación se explicarán los diferentes tipos de combustibles, clasificándolos de acuerdo a su fase o estado original, a saber:

- Combustibles sólidos.
- Combustibles líquidos.
- Combustibles gaseosos.

2.2.2.1 Combustibles Sólidos.

El proceso de combustión de estos combustibles difiere bastante con respecto a los combustibles líquidos y los gaseosos.

La buena o mala combustión del sólido depende de la facilidad del acceso del aire a las diversas partículas del combustible. Estas deben estar distribuidas uniformemente sobre la superficie de combustión, no se debe encontrar aglomerado.

Las principales características de los combustibles sólidos están referidas al poder calorífico, el contenido de material volátil, contenido de cenizas, contenido de humedad, temperatura de fusión de las cenizas, granulometría y características aglomerantes del sólido.

Los combustibles sólidos son usados en forma pulverizada o en suspensión trituradas y en lechadas; en el primer caso, es transportado por aire, en su forma triturada es llevado por bandas transportadoras y quemado en parrillas que pueden ser fijas o móviles. En el caso de lechadas, el carbón mediante la adición de tenso activos y mezclado con agua o hidrocarburo forma una emulsión o lechada que facilita su transporte manejándose como si fuera un líquido.

El proceso de combustión de un sólido está dividido en cuatro períodos o fases a saber:

a) *Secado del combustible*: Al comenzar a recibir calor, el combustible se seca, evaporando la humedad que posee, convirtiéndose en vapor de agua.

El secado es un proceso al cual se somete todo combustible húmedo. Parte de la energía generada en el proceso de combustión es utilizada para secar el combustible, como consecuencia de ello se ocasiona una disminución de temperatura en la cámara y una disminución en la velocidad del proceso de combustión. Una humedad alta en el combustible requiere de mayor volumen de cámara de combustión y del área de parrilla para el caso de quema de sólido en lechos fijos.

Mediante un pre-tratamiento de secado se busca eliminar el contenido de humedad presente en los combustibles sólidos tales como el carbón, madera, bagazo, biomasa, etc.

b) *La Destilación*: Comienza cuando se ha evaporado toda la humedad del combustible y se comienzan a quemar los más volátiles (requieren menor temperatura de inflamación).

c) Al aumentar la temperatura debido a la combustión de los primeros hidrocarburos que queman, se alcanzan las condiciones para que se quemen los hidrocarburos menos volátiles, casi todos los componentes activos del combustible.

d) Quemadas todas las sustancias volátiles, la llama se apaga, quedando las cenizas del sólido, conformada principalmente por la escoria y los componentes inactivos.

El uso de combustibles sólidos requiere una mayor inversión para el almacenamiento, preparación, manejo y transporte del combustible, pero a su vez su costo es mucho más bajo que los combustibles líquidos y gaseosos.

Los combustibles sólidos los podemos clasificar en:

- Carbones minerales como carbón antracita, bituminoso, lignito, etc.
- Carbones vegetales como la madera.
- Biomásas sólidas tales como el bagazo, cascarilla de arroz, residuo de café, etc.
- Desechos sólidos combustibles como el caucho, polietileno, cartón, etc.

A la hora de la selección de los combustibles sólidos debemos tener en cuenta ciertas consideraciones básicas como:

- La disposición de las cenizas
- Los efectos abrasivos
- La fácil combinación con otros combustibles
- El tipo de ceniza que producen
- El manejo de los sólidos residuales.

2.2.2.2 Combustibles Líquidos.

Son, con pocas excepciones, mezclas de hidrocarburos derivados del petróleo por medio de procesos de refinación. Sin embargo, a diferencia del carbón, en el petróleo se pueden distinguir diferentes compuestos. Además de hidrocarburos (más de 40 de ellos diferentes), el petróleo contiene pequeñas cantidades de oxígeno, nitrógeno, azufre, vanadio, níquel, hierro, trazas de otros metales e impurezas tales como agua y sedimentos.

Los petróleos están constituidos por distintos hidrocarburos, con diversos grados de densidad y volatilidad. La diversidad en las proporciones de los elementos que los componen, hacen que difieran fundamentalmente las características del petróleo obtenido en un lugar, con respecto al obtenido en otro sitio.

Los diversos productos obtenidos, tanto en la destilación primaria como en la secundaria, son sometidos a procesos de refinación, con el objeto de eliminar los componentes indeseables y nocivos que puede contener los mismos.

De la destilación primaria y secundaria a la que se somete el petróleo se obtiene una gran diversidad de productos. Los principales son: Kerosene, Gas-oil, Diesel-oil, Fuel-oil (Petróleo Residual), entre otros.

La destilación fraccionada del crudo produce un gran número de productos. En una primera etapa se separan a temperaturas de 340° C y a presión atmosférica, gases que posteriormente se licuan produciendo gasolina, disolventes, Kerosene y fuel oil livianos. La porción que tiene un punto de ebullición superior a 340° C, llamada crudo reducido, se somete a destilación en vacío para obtener fuel oil pesados, lubricantes, parafina, etc.

El fuel oil se clasifica en diferentes grados, los cuales son estándares recomendados por la ASTM. Se basan en varias características, entre las cuales las más importantes son la gravedad específica y la viscosidad. El No. 1 y el No. 2 se denominan destilados o livianos, mientras que el No. 4, el No. 5 y el No. 6 se llaman residuales o pesados. La viscosidad del fuel oil varía entre 42° API para el No. 1 hasta 12° API para el No. 6. El No. 5 y No.6 requieren calentamiento para su bombeo y combustión satisfactoria.

El residuo final de la destilación, llamado bunker, es el más utilizado como combustible, por su bajo costo, mezclado con aceites más ligeros o en forma natural, para calderas, calefacción, etc. Aunque los combustibles líquidos son mezclas de muchos hidrocarburos diferentes, por conveniencia en los cálculos ingenieriles se le considera como un solo hidrocarburo.

Combustibles Líquidos Industriales

En el caso de los productos de la destilación del petróleo crudo, prácticamente todos son combustibles, pero no todos se emplean como combustibles industriales. Los combustibles líquidos derivados del petróleo que se emplean a nivel industrial, básicamente están constituidos por los destilados más pesados y por los residuales que salen por el fondo de la columna de destilación.

En la **Tabla_1** se incluyen los valores típicos que presentan los combustibles de mayor utilización a nivel industrial.

Tabla_1 Análisis Típicos de Algunos Combustibles de Uso Industrial

Características	Diesel 2	Residual 4	Residual 6	Residual 500
Gravedad °API	33	25,5	15,2	14,3
Pto. Inflamación (°C)	52	77	105	110
Viscosidad CST a 100°F	4,48	19,5	615 ^(*)	1028 ^(*)
Cenizas (% en peso)	0,01	0,01	0,07	0,08
Punto de Fluidez (°C)	-10	-4	15	16
Azufre (% en peso)	0,04	0,5	1,2	1,3
Poder Calorífico (btu/gal)	140000	144650	151000	151700
Agua y Sedimentos (% en volumen)	0,0	0,02	0,10	0,10
Gravedad Específica	0,8602	0,9012	0,9646	0,9785

^(*) medido a 122°F

Debido a que la composición química de los combustibles líquidos es muy parecida, se utilizan sus propiedades físicas para determinar las diferencias que cada líquido tiene en los procesos de combustión y que inciden en su selección, dichas propiedades son: Gravedad específica., Viscosidad, Poder calorífico, Punto de inflamación, Contenido de carbón Conradson, Contenido de ceniza, Contenido de sedimento y agua, Contenido de azufre.

En base a sus análisis típicos, los combustibles más utilizados en la practica industrial pueden ser caracterizados en los siguientes términos:

a. Diesel 2: Aunque una gran proporción de su producción se consume en el sector transportes, también se utiliza en usos industriales, cuando por el tamaño y capacidad de los equipos o por condiciones del proceso mismo, no resulta posible o conveniente utilizar combustibles residuales.

Sus características diferenciales más importantes para uso industrial son las siguientes:

- No requiere calentamiento previo para ser bombeado, ni para su atomización.

- Por ser un producto destilado, es un combustible limpio, con mínimo contenido de cenizas, sin humedad, ni sedimentos y bajo contenido de azufre.
- Su poder calorífico expresado en función del volumen es menor que el de los combustibles residuales.

b. Residual 4: Su empleo se proyecta a sustituir al Diesel 2 en sus usos industriales, al presentar características similares en razón de conformarse con una proporción de Diesel 2 que varía entre 70% y 80%, siendo el resto Residual 6.

Sus características diferenciales son:

- En condiciones normales, no requiere calentamiento para su bombeo ni para su atomización.
- El contenido de impurezas, tales como cenizas, agua, sedimentos y azufre, es ligeramente superior al del Diesel 2, no representando en la práctica mayor problema.
- El atractivo de su utilización sustituyendo al Diesel 2 es de carácter económico, siendo normalmente inferior su precio en un 10% - 15% y su combustión en condiciones similares.

c. Residual 6: Como producto residual de la destilación, presenta características marcadamente diferentes a los destilados, en razón de la presencia de impurezas que juegan un significativo papel en cuanto a eficiencia de combustión, contaminación de productos y mantenimiento de equipos.

Sus características se encuentran normalizadas, pero presentan algunas variaciones en cuanto a composición, en función del crudo del que proceden y el proceso de refinación utilizado:

- Requiere ser calentado, tanto para su bombeo(45°C) como para su correcta atomización (110°C).
- El contenido de cenizas, presentando en su composición elementos que resultan corrosivos en condiciones térmicas exigentes, tales como vanadio, níquel, sodio, magnesio, etc. requieren especial atención.

- El contenido de azufre, normalizado en menos de 2% representa uno de los aspectos de mayor efecto potencial en cuanto a problemas de corrosión y contaminación.
- El contenido de agua y arrastre de sedimentos también representa un factor que puede aportar problemas, particularmente cuando no se les presta la atención que requieren, las etapas de recepción y almacenamiento.

Aunque su combustión resulta más problemática que la del Diesel 2 y el Residual 4, su empleo se justifica por una conveniencia económica derivada de su precio inferior en el mercado o razones de disponibilidad.

d. Residual 500 (de alta viscosidad): Aunque su denominación aparenta una gran diferencia respecto al residual 6, realmente la diferencia entre ambos es muy pequeña y se establece únicamente por la adición de un 5% - 10% de Diesel al producto de refinación que sale con una viscosidad aproximada de 500 SSF a 122°F para disminuirla a menos de 300 SSF que establece la norma para el residual 6.

Sus características son muy similares a las del residual 6. Así:

- Resultará necesario calentarlo para su bombeo en 5°C más que el residual 6.
- La temperatura necesaria de calentamiento para disminuir su viscosidad al rango requerido por los quemadores es 10°C mayor que la del residual 6.

2.2.2.3 Combustibles Gaseosos.

La combustión de combustibles gaseosos en comparación con los líquidos, es limpia y sin problemas de operación. Aunque muchos combustibles gaseosos se han utilizado en el pasado, hoy en día estos se han limitado prácticamente al gas natural, al gas licuado del petróleo ó GLP y a los gases manufacturados. El hidrógeno está recibiendo atención considerable, debido a que se trata de un gas combustible no contaminante.

Los combustibles gaseosos son de fácil quemado, ya que para su combustión sólo requiere ser mezclado con determinada cantidad de aire a condiciones óptimas de temperatura.

Los gases combustibles de diferente origen y características se agrupan en familias, a saber:

- **Primera familia:** se incluyen los gases manufacturados, cuyo principal componente es el hidrógeno; y son: el gas de alumbrado, el acetileno, el gas de agua, el gas de aire, gas pobre o mixto, gas de altos hornos y el hidrógeno el cual produce una combustión muy limpia; aunque al quemarse con aire se pueden producir óxidos de nitrógeno, esta emisión es mucho menor que cuando se quema un líquido.
- **Segunda familia:** se incluye el gas natural, el cual es un combustible gaseoso, que está compuesto fundamentalmente por metano, pequeñas cantidades de otros gases combustibles como el etano y otros no combustibles como el nitrógeno y el dióxido de carbono. El gas natural permanece en el estado gaseoso, bajo presión atmosférica y temperatura ambiente. La composición en volumen típica del gas natural comercial (*Tabla_2*) es:

Tabla_2 Composición en Volumen Típica del Gas Natural Comercial

Componente	Composición %
Metano	70 a 96
Etano	1 a 14
Propano	0 a 4
Butano	0 a 2
Pentano	0 a 0, 5
Hexano	0 a 2
Dióxido de carbono	0 a 2
Oxígeno	0 a 1, 2
Nitrógeno	0, 4a 17

Las especificaciones de calidad del gas para Perú se muestran en la **Tabla_3**.
Condiciones estándar de 15°C y 1013 mbar.

Tabla_3 Especificaciones de calidad del gas para Perú

Propiedad	Unidades	Especificaciones de calidad	
		Mínimo	Máximo
Poder calorífico bruto.	Kcal/sm ³	8450	10300
Sulfuro de Hidrógeno. (H ₂ S)	mg/sm ³		3
Azufre Total. (S)	mg/sm ³		15
Vapor de agua	mg/sm ³		65
Dióxido de carbono. (CO ₂).	% Vol.		3,5
Gases Inertes (*).	% Vol.		6
Temperatura.	°C.		50
Material Sólido.		Libre de polvos, gomas y de cualquier sólido que pueda ocasionar problemas en la tubería.	
Líquidos.		Libre de agua en estado líquido.	

(*) Entendiéndose como gases inertes a la suma del contenido de nitrógeno y otros gases diferentes al dióxido de carbono.

Fuente: Contrato de licencia para la explotación de hidrocarburos en el lote 88 (Lima, 28 de noviembre del 2000)

Tabla_4 Abreviaturas

Kcal	Kilocalorías
mg	miligramos
sm ³	Metro cúbico medido a condiciones estándar de presión y temperatura
% Vol	Porcentaje en volumen
°C	Grado centígrado (Celsio)

Normalmente al gas natural se le agrega un odorante para darle un olor característico, como medida de seguridad cuando se utiliza en el sector residencial.

- **Tercera familia: Propano, Butano y GLP.** Estos combustibles derivados del petróleo se almacenan en estado líquido pero se alimentan a los equipos de combustión en estado gaseoso. Su uso industrial es prácticamente en cualquier

equipo que requiera un combustible limpio y controlable fácilmente: hornos para tratamientos de metales, vidrio, cerámica, etc.; planchado de ropa; purificación de grasas; endurecimiento de metales, tratamientos térmicos; pasteurización; corte de metales; etc.

2.2.3 Tipos de Combustión

El objetivo fundamental de la combustión es el de conseguir la oxidación total del carbono y del hidrógeno para formar dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O), con lo cual se produce la máxima energía en forma de calor de la combustión y se evita efectos contaminantes.

De acuerdo al nivel que se consiga en el logro de tal objetivo, se puede considerar los siguientes tipos de combustión:

- ✓ Combustión perfecta (estequiométrica)
- ✓ Combustión completa (con exceso de aire)
- ✓ Combustión incompleta (con defecto de aire)
- ✓ Combustión imperfecta

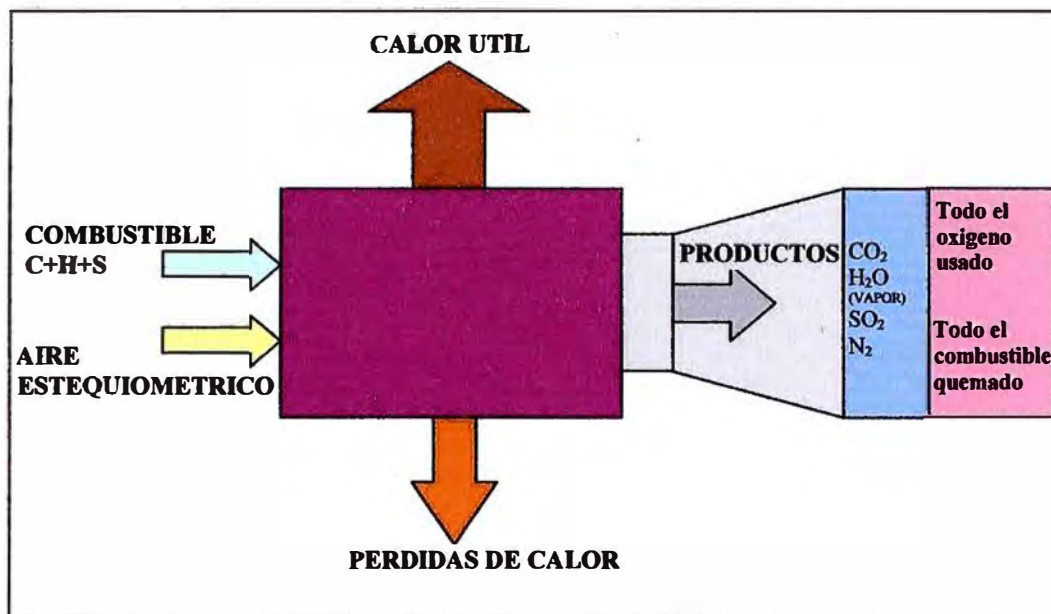
2.2.3.1 Combustión Perfecta (Estequiométrica)

Este tipo de combustión se consigue mezclando y quemando las cantidades exactamente requeridas de combustible y oxígeno, los cuales se queman en forma completa y perfecta (*Fig. 1*).

Esta combustión completa está sin embargo, fuertemente limitada por condiciones químicas y físicas, ya que solo en teoría podemos hablar de reacciones perfectamente estequiométricas.

Se plantean para realizar los cálculos teóricos de la combustión, etc. En función de la composición del combustible y el comburente empleados.

Figura_1 Esquema de Combustión Perfecta



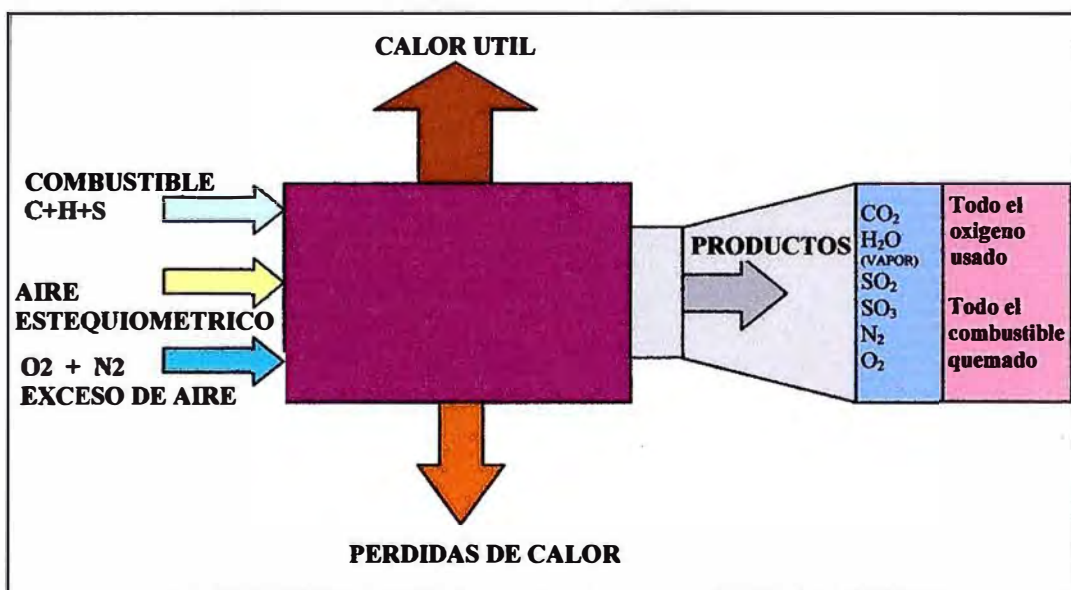
2.2.3.2 Combustión Completa (con exceso de aire)

Para tener una combustión completa, es decir, sin presencia de monóxido de carbono en los humos de chimenea, es necesario emplear una proporción de oxígeno superior a la teórica (*Fig. 2*). Este exceso de aire conlleva especialmente dos efectos importantes en cuanto al proceso de combustión:

- Disminución de la temperatura máxima posible al aumentar la cantidad de gases en la combustión.
- Variación sensible en cuanto a la concentración de los óxidos formados respecto al nitrógeno, lo que se traduce en una disminución de la eficiencia de la combustión.

El exceso de aire se expresa en porcentaje restándole el teórico estequiométrico, el cual corresponde al 100%; es decir, una cantidad de aire de combustión del 120% respecto al estequiométrico, se expresará como 20 % de exceso de aire.

Figura_2 Esquema de Combustión Completa con Exceso de Aire



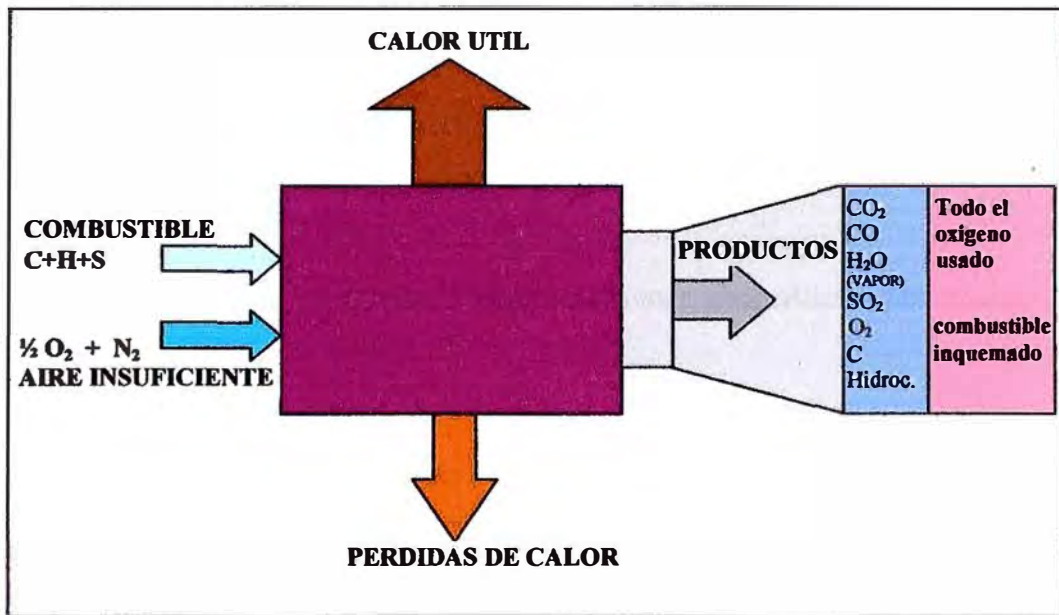
2.2.3.3 Combustión Incompleta con defecto de aire.

Cuando el oxígeno presente en la combustión no alcanza el valor del teórico necesario para la formación de CO₂, H₂O y SO₂ la combustión es necesariamente incompleta (*Fig. 3*), apareciendo en los gases de combustión el monóxido de carbono, hidrógeno y partículas sólidas de carbono, azufre o sulfuros.

Considerando que estos componentes de los gases que se eliminan a la atmósfera contienen aún apreciable contenido calorífico, las pérdidas por combustión incompleta son elevadas cuando se proporciona menos aire del necesario. En la práctica, la presencia de inquemados resulta determinante del exceso de aire necesario.

Un 1% de CO en los gases produce un pérdida de aproximadamente un 4% del poder calorífico del combustible.

Figura_3 Combustión Incompleta con Defecto de Aire



2.2.3.4 Combustión Imperfecta.

Se produce una combustión imperfecta o pseudo combustión oxidante cuando pese a existir exceso de aire, no se completan las reacciones de combustión, apareciendo en los humos de chimenea productos de combustión incompleta, tales como inquemados, residuos de combustibles sin oxidar, partículas sólidas, etc. (Fig._4).

Este tipo de combustión puede producirse debido a las siguientes causas:

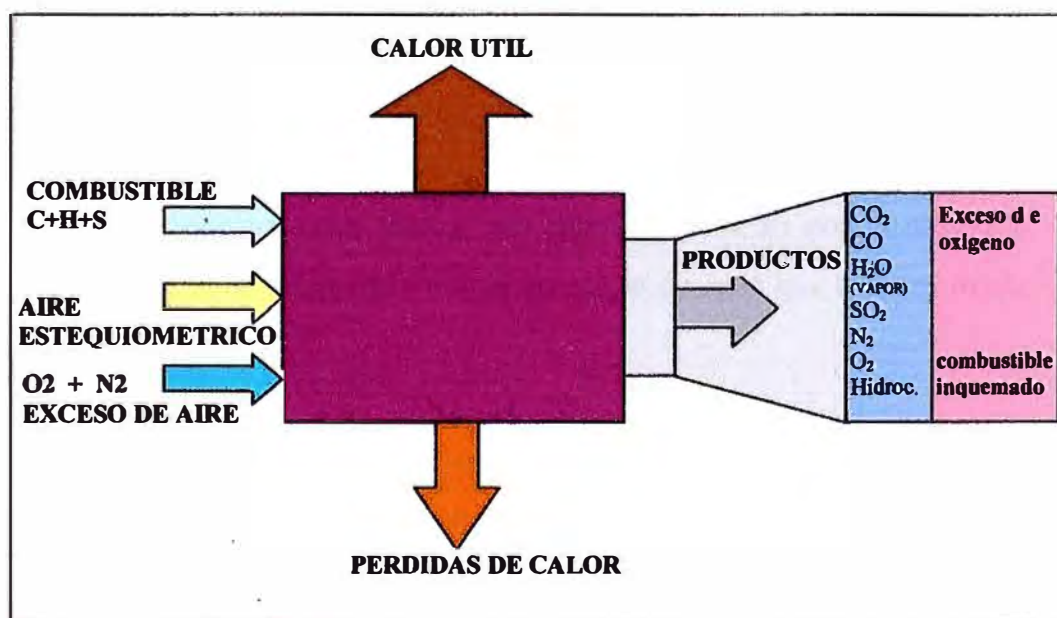
- La elevada carga térmica del hogar, es decir, la relación entre la potencia calorífica y el volumen del hogar, ya que existe poco tiempo de permanencia.
- La escasa turbulencia, existiendo por tanto una mala mezcla aire-combustible, lo que en muchos quemadores se produce por cantidad insuficiente de aire o por estar trabajando a una fracción muy pequeña de su potencia nominal.
- La falta de uniformidad de pulverización en los combustibles líquidos, ya que cuanto mayor sea el número de gotas de gran tamaño, tanto más fácil es que se produzcan inquemados, puesto que una gota de gran tamaño necesita un tiempo mayor de permanencia para quemarse por completo.

- El enfriamiento de la llama, lo que puede ocurrir cuando la mezcla aire-combustible incide sobre superficies relativamente frías, como el frente de la cámara de combustión o las paredes de un tubo de llama y también cuando se trabaja con un gran exceso de aire.
- El alto porcentaje de carbono en los combustibles.

En la práctica, éste es el tipo de combustión más generalizado por resultar más ajustado a la realidad.

En la medida que se mejore la combustión imperfecta aproximándose a las condiciones teóricas de combustión completa con mínimo exceso de aire, se logrará mejores rendimientos y se evitará efectos contaminantes.

Figura_4 Combustión Imperfecta



2.3 Gas Natural

2.3.1 ¿Qué es el Gas Natural?

Aunque como gases naturales pueden clasificarse todos los que se encuentran de forma natural en la Tierra, desde los constituyentes del aire hasta las emanaciones gaseosas de los volcanes, el término “gas natural” se aplica hoy en sentido estricto a las mezclas de gases combustibles hidrocarbureados o no, que se encuentran en el subsuelo, donde en ocasiones, aunque no siempre, se hallen asociados con petróleo líquido. El principal constituyente del gas natural es siempre el metano, que representa generalmente entre el 75 y el 95% del volumen total de la mezcla, razón por la cual se suele llamar metano al gas natural. Los otros hidrocarburos gaseosos que suelen estar presentes, etano, butano y propano, aparecen siempre en proporciones menores. Entre los constituyentes distintos a los hidrocarburos suelen ser nitrógeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, helio y argón los más importantes.

El gas natural arrastra desde los yacimientos componentes indeseables como son: el ácido sulfhídrico (H_2S), dióxido de carbono (CO_2) y agua en fase gaseosa, por lo que se dice que el gas que se recibe es un gas húmedo, amargo e hidratado; amargo por los componentes ácidos que contiene, húmedo por la presencia de hidrocarburos líquidos e hidratado por la presencia de agua que arrastra desde los yacimientos.

Existen diversas denominaciones para el gas natural, y por lo general se asocia a los compuestos que forman parte de su composición. Por ejemplo cuando en el gas natural hay H_2S a nivel por encima de 4 ppm por cada pie cúbico de gas se dice que es un gas “amargo” y cuando la composición desciende a menos de 4 ppm se dice que es un gas “dulce”.

El gas natural se encuentra en la naturaleza como “Gas Asociado”, cuando está acompañado de petróleo y como “Gas no Asociado”, cuando no contiene petróleo.

En los yacimientos, generalmente, el gas natural asociado se encuentra como gas húmedo amargo, mientras que el no asociado puede hallarse como húmedo amargo, húmedo dulce o seco. Cabe señalar, sin embargo, que los dos últimos pueden ser obtenidos a partir del primero, una vez procesado. De suerte que, al eliminar los compuestos de azufre, el gas húmedo amargo se transforma en gas húmedo dulce, y al extraer de éste los productos licuables se obtiene el gas seco.

Por su almacenamiento o procesamiento, el gas se clasifica en gas natural comprimido, gas seco almacenado a alta presión en estado gaseoso en un recipiente, y gas natural licuado (GNL), compuesto predominantemente de metano, que ha sido licuado por compresión y enfriamiento para facilitar su transporte y almacenamiento.

Componentes del Gas Natural

No existe una composición o mezcla que se pueda tomar para generalizar la composición del gas natural. Cada gas tiene su propia composición, de hecho dos pozos de un mismo yacimiento puede tener una composición diferente entre sí. También la composición del gas varía conforme el yacimiento va siendo explotado, es por eso que se deberá hacer un análisis periódico al gas que es extraído, para adecuar los equipos de explotación a la nueva composición y evitar problemas operacionales.

Cuando el gas natural es extraído de los yacimientos presenta impurezas, las cuales hay que eliminar ya que pueden provocar daños al medio ambiente, corrosión en equipos o disminuir el valor comercial del gas. Normalmente se compone de hidrocarburos con muy bajo punto de ebullición.

La **Tabla_5** nos muestra los componentes que a menudo son encontrados en la composición del gas natural.

Tabla_5 Componentes del Gas Natural

Clase	Componente	Fórmula
Hidrocarburos	Metano Etano Propano i-Butano n-Butano i-Pentano n-Pentano Ciclo pentano Hexanos y pesados	CH ₄ C ₂ H ₆ C ₃ H ₈ iC ₄ H ₁₀ nC ₄ H ₁₀ iC ₄ H ₁₀ nC ₄ H ₁₀ C ₅ H ₁₀
Gases inertes	Nitrógeno Helio Argón Hidrógeno Oxígeno	N ₂ He Ar H ₂ O ₂
Gases ácidos	Ácido sulfhídrico Dióxido de carbono	H ₂ S CO ₂
Compuestos de azufre	Mercaptanos Sulfuros Disulfuros	R-SH R-S-R R-S-S-R
Otros	Vapor de agua Agua dulce o salada	

Contaminantes en el Gas Natural

I. Agua

El vapor de agua es generalmente el contaminante más importante del gas natural. Su eliminación o reducción es importante para:

- ✓ Evitar formación de hidratos que originan taponeo de tubos.
- ✓ Evitar acumulación de agua en tuberías porque reduce el diámetro efectivo y la capacidad de flujo.
- ✓ Evitar corrosión interna de tuberías, conexiones (codos, reducciones, etc.) equipos, especialmente si el agua contiene CO₂ ó H₂S.

El agua puede ser arrastrada con el gas como vapor de agua o en forma de gotas, sin embargo, a cada presión y temperatura existe una máxima cantidad de

vapor de agua que el gas es capaz de contener. En este caso se dice que el gas está saturado.

II. Inertes

Reducen la eficiencia de los sistemas de transporte de gas y de las plantas de fraccionamiento y tratamiento (ocupan volumen y consumen calor innecesariamente). No son corrosivos.

a) *Nitrógeno*.- se encuentra en amplio rango, hasta 34 % en volumen. Probablemente su origen es atmosférico. Su separación de otros contaminantes es complicada porque no se ha encontrado un solvente selectivo. La ventaja de su eliminación radica en el incremento de la potencia calorífica del gas.

b) *Helio*.- se encuentra en cantidades pequeñas, menores de 1 % en volumen. El helio es un producto de la desintegración radiactiva. Se extrae del gas por un sistema combinado de refrigeración y fraccionamiento.

III. Constituyentes Corrosivos

Se encuentra en el gas natural desde trazas hasta 10% en volumen y pueden ser:

- ✓ Sulfuro de hidrógeno (H₂S)
- ✓ Dióxido de Carbono (CO₂)
- ✓ Sulfuro de Carbonilo (COS)
- ✓ Mercaptanos (RSH)
- ✓ Disulfuro de Carbono (CS₂)
- ✓ Ácido Cianhídrico (HCN)

2.3.2 Origen

El Gas Natural es un recurso energético, de origen natural, fósil, que puede encontrarse tanto en los suelos marinos como continentales. Su origen se remonta a millones de años atrás, con la muerte y descomposición de distintos organismos como animales y plantas, quienes quedaron sepultados bajo lodo y arena, pasado el tiempo sobre sus cadáveres. Extensos milenios pasaron sobre sus cuerpos, como el polvo que se depositó sobre estos degradados organismos, que poco a poco fue hundiéndolos más y más profundo, mientras que la presión que la tierra ofreció sobre estos cuerpos, sumado al intenso calor que el magma bajo las placas

terrestres ofrecía, permutó estos cuerpos en petróleo crudo y gas natural. Este último, suele encontrarse entre las porosidades de las rocas que lo contienen, aunque pueden encontrarse atrapadas entre sólidas rocas subterráneas que no permiten que el gas fluya entre porosidades. Cuando esto sucede, se conoce como un yacimiento.

Estos yacimientos tienen dos clasificaciones generales, dependiendo de la presencia de petróleo junto con el gas. Cuando ambos comparten el yacimiento, se habla de yacimientos asociados, mientras que cuando el gas natural se encuentra únicamente con pequeñas partes de otros gases e hidrocarburos, se habla de yacimientos no asociados.

2.3.3 Historia del Gas Natural

El descubrimiento del gas natural data de la antigüedad en el Medio Oriente. Hace miles de años, se pudo comprobar que existían fugas de gas natural que prendían fuego cuando se encendían, dando lugar a las llamadas "fuentes ardientes". En Persia, Grecia o la India, se levantaron templos para prácticas religiosas alrededor de estas "llamas eternas". Sin embargo, estas civilizaciones no reconocieron inmediatamente la importancia de su descubrimiento. Fue en China, alrededor del año 900 antes de nuestra era, donde se comprendió la importancia de este producto. Los chinos perforaron el primer pozo de gas natural que se conoce en el año 211 antes de nuestra era.

En Europa no se conoció el gas natural hasta que fue descubierto en Gran Bretaña en 1659, aunque no se empezó a comercializar hasta 1790. En 1821, los habitantes de Fredonia (Estados Unidos) observaron burbujas de gas que remontaban hasta la superficie en un arroyo. William Hart⁽¹⁾, considerado como el "padre del gas natural", excavó el primer pozo norteamericano de gas natural.

Durante el siglo XIX el gas natural fue casi exclusivamente utilizado como fuente de luz. Su consumo permaneció muy localizado por la falta de

infraestructuras de transporte que dificultaban el traslado de grandes cantidades de gas natural a grandes distancias. Las tuberías para transporte del gas han ido perfeccionándose a través del tiempo. Los chinos, hace siglos, transportaban el gas por medio de cañas de bambú. En 1890, se produjo un importante cambio con la invención de las juntas a prueba de fugas en los gasoductos. No obstante, las técnicas existentes no permitieron transportar el gas natural a más de 160 kilómetros de distancia por lo que el producto se quemaba o se dejaba en el mismo lugar. El transporte del gas natural a grandes distancias se generalizó en el transcurso de los años veinte, gracias a las mejoras tecnológicas aportadas a los gasoductos, además se transporta en buques criogénicos, a muy baja temperatura pero a presión atmosférica. Después de la segunda guerra mundial, el uso del gas natural creció rápidamente como consecuencia del desarrollo de las redes de gasoductos y de los sistemas de almacenamiento.

En los primeros tiempos de la exploración del petróleo, el gas natural era frecuentemente considerado como un subproducto sin interés que impedía el trabajo de los obreros forzados a parar de trabajar para dejar escapar el gas natural descubierto en el momento de la perforación. Hoy en día, en particular a partir de las crisis petroleras de los años 70, el gas natural se ha convertido en una importante fuente de energía en el mundo.

Durante muchos años, la industria del gas natural estuvo fuertemente regulada debido a que era considerada como un monopolio de Estado. En el transcurso de los últimos 30 años, se ha producido un movimiento hacia una mayor liberalización de los mercados del gas natural y una fuerte desregulación de los precios de este producto. Esta tendencia tuvo como consecuencia la apertura del mercado a una mayor competencia y la aparición de una industria de gas natural mucho más dinámica e innovadora. Además, gracias a numerosos avances tecnológicos se facilitó el descubrimiento, la extracción y el transporte de gas natural hasta los consumidores. Estas innovaciones permitieron también mejorar

las aplicaciones existentes así como crear nuevas aplicaciones. El gas natural es cada vez más utilizado para la producción de electricidad.

⁽¹⁾ <http://www.mineco.es/energia/hidrocarburos/gas/presentac.htm>

2.3.4 Características

El gas natural es incoloro, inodoro, insípido, sin forma particular y más ligero que el aire. Por razones de seguridad, se le añade mercaptan, un agente químico que le da un olor a huevo podrido, con el propósito de detectar una posible fuga de gas.

El metano, que es un compuesto principal del gas natural, es altamente inflamable, se quema fácilmente y casi totalmente y emite muy poca contaminación. El gas natural no es ni corrosivo ni tóxico, su temperatura de combustión es elevada y posee un estrecho intervalo de inflamabilidad, lo que hace de él un combustible fósil seguro en comparación con otras fuentes de energía. Además, por su densidad de 0,60, inferior a la del aire (1,00), el gas natural tiene tendencia a elevarse y puede, consecuentemente, desaparecer fácilmente del sitio donde se encuentra por cualquier grieta.

A una presión atmosférica normal, si el gas natural se enfría a una temperatura de $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente, se condensa bajo la forma de un líquido llamado gas natural licuado (GNL). Un volumen de este líquido ocupa casi 600 veces menos espacio que el gas natural y es dos veces menos pesado que el agua (45% aproximadamente). Puesto que el gas natural licuado ocupa menos espacio, el gas natural se licua para facilitar su transporte y almacenaje. Cuando se evapora se quema solamente en concentraciones del 5 % al 15% mezclado con el aire. Ni el GNL ni su vapor pueden explotar al aire libre.

El gas natural es considerado como un combustible limpio. Bajo su forma comercializada, casi no contiene azufre y virtualmente no genera dióxidos de azufre (SO_2). Sus emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) son menores a las

generadas por el petróleo y el carbón. Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) son inferiores a la de otros combustible fósiles (según Eurogas emiten 40 a 50% menos que el carbón y 25 a 30% menos que el petróleo).

2.2.5 Usos del Gas Natural

El gas natural es un recurso no renovable, que debido a sus características combustibles se le ha dado una amplia gama de aplicaciones que van desde el uso doméstico hasta las diversas ramas industriales. Para que este combustible pueda ser utilizado es conveniente que pase por un proceso de purificación, que es denominado endulzamiento, ya que el gas tal como es extraído de los yacimientos, contiene algunos compuestos indeseables como el ácido sulfhídrico, dióxido de carbono y agua, los que ocasionan contaminación y restan poder calorífico al gas.

El gas natural es el mejor combustible que pueden usar las industrias que utilizan hornos y calderos en sus procesos productivos. Por sus características reemplaza ventajosamente a otros combustibles. El gas natural puede sustituir a los siguientes combustibles:

- Diesel.
- Residuales.
- Gas licuado de petróleo (GLP).
- Kerosene.
- Carbón.
- Leña.

▪ Industria del Vidrio



Las propiedades físico-químicas del gas natural han hecho posible la construcción de quemadores que permiten una llama que brinda la luminosidad y la radiación necesarias para conseguir una óptima transmisión de la energía calórica en la masa de

crystal. Asimismo es importante mencionar que con el gas natural el producto final (vidrio) sale limpio.

▪ **Industria de Alimentos**



En la producción de alimentos el gas natural se utiliza en los procesos de cocimiento y secado. El gas natural es el combustible que permite cumplir las exigencias de calidad ISO, que son requerimientos para ciertos productos de exportación.

▪ **Industria Textil**



El gas natural permite el calentamiento directo por convección en sustitución del tradicional sistema de calentamiento mediante fluidos intermedios, con el consiguiente ahorro energético (entre el 20 y el 30%).

▪ **Industria de Cerámicas**



El uso del gas natural en esta industria es muy ventajoso debido a que se consigue un ahorro económico y permite la obtención de productos de mejor calidad. Cabe indicar que los productos acabados de esta industria requieren de mucha limpieza y con el gas natural se consigue esta exigencia.

- **Industria del Cemento**



Los hornos de las cementeras que utilizan gas natural son más eficientes y tienen mayor vida útil; no requieren de mantenimiento continuo y los gases de combustión no contaminan el ambiente como los demás combustibles.

- **Fundición de Metales**



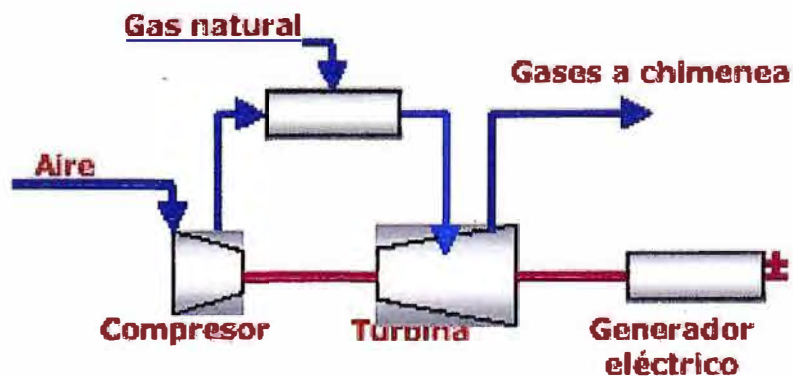
El gas natural ofrece a la industria metalúrgica variadas aplicaciones. Sus características lo hacen apto para todos los procesos de calentamiento de metales, tanto en la fusión como en el recalentamiento y tratamientos térmicos.

- **Generación de Electricidad**

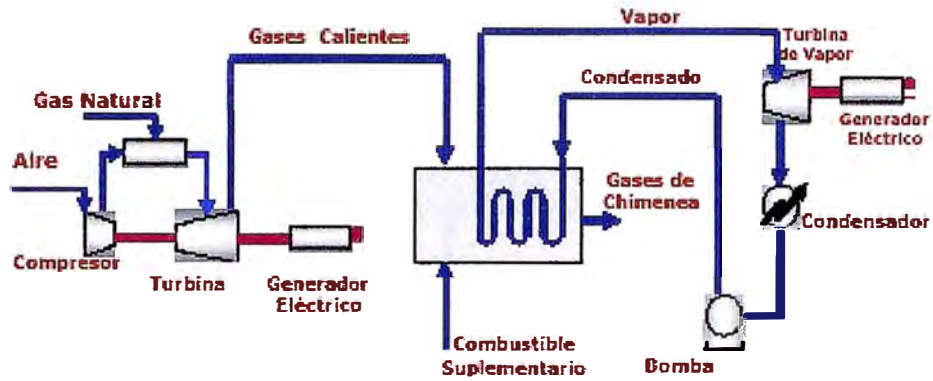
El gas natural es el combustible más económico para la generación de electricidad y el que produce menor impacto ambiental. Estas ventajas pueden conseguirse tanto en grandes como en pequeñas centrales termoeléctricas.

La generación de electricidad con gas natural es posible mediante turbinas.

Figura_5 Generación de Energía Eléctrica con Ciclo Simple



Figura_6 Generación de Energía Eléctrica con Ciclo Combinado

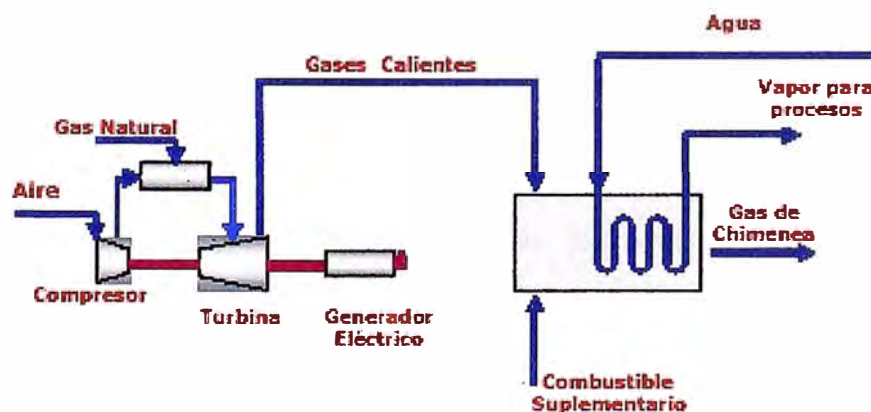


▪ **Cogeneración**

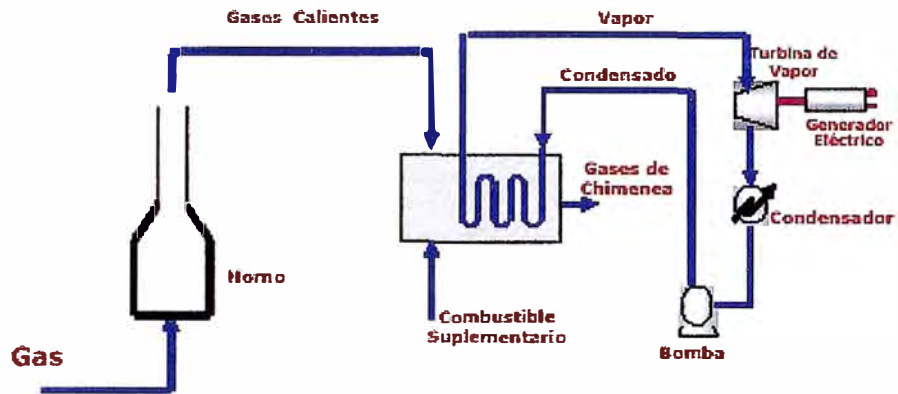
Se denomina Cogeneración a la producción conjunta de Energía Eléctrica y Energía Calorífica aprovechable, en forma de gases calientes.

La Cogeneración es una forma eficiente de cubrir las necesidades energéticas de las instalaciones industriales en prácticamente todos los sectores de la actividad (calefacción, calentamiento de agua, etc.).

Figura_7 Cogeneración Simple con Turbina de Gas



Figura_8 Cogeneración Aprovechando Gases de Combustión del Horno



▪ **Hierro Esponja**

De manera resumida se puede definir al Hierro Esponja como la reducción de un óxido en estado sólido elevando su temperatura pero sin llegar a la de fusión, utilizando para ello un elemento reductor que puede ser gas natural convertido a gas de síntesis.

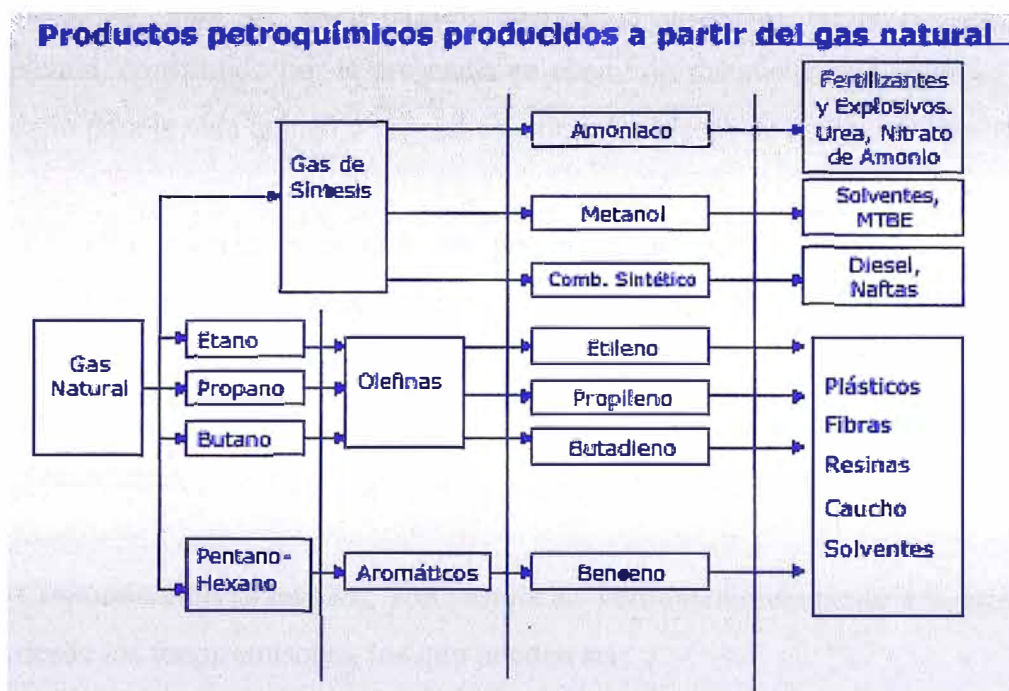


▪ **Petroquímica**

El gas natural es materia prima para la fabricación de diversos productos petroquímicos.

A continuación se presenta un esquema petroquímico *Figura_9*, cuya complejidad dependerá de la composición que posee el Gas Natural.

Figura_9 Esquema Petroquímico



2.4 Conceptos Básicos de Contaminación Ambiental

2.4.1 Contaminación Ambiental

El aire atmosférico está constituido por aire seco y vapor de agua en proporciones variables. El aire seco es una mezcla de varios gases, siendo los más importantes el oxígeno que constituye el elemento básico de la vida formando parte de los procesos de combustión y el nitrógeno que constituye un gas inerte. Además, existen pequeñas cantidades de dióxido de carbono producto de los procesos de combustión, fermentación y desprendimientos naturales e industriales y otros gases, tales como el argón, neón, criptón, metano, ozono, etc.

Las alteraciones de la composición del aire es un hecho que normalmente se produce por efectos naturales como las erupciones volcánicas, terremotos, incendios forestales, emanaciones de polvo, polen etc., pero las mismas han sido incrementadas en los últimos años por el gran desarrollo tecnológico de la humanidad, sustentada en la explotación de los combustibles fósiles, con la aparición de enormes complejos fabriles, grandes ciudades y un aumento considerable de los medios de transporte automotor.

De modo que, junto a la industrialización tendiente al bienestar y el aumento del nivel de vida de las personas, aparece el problema de la contaminación ambiental, constituido por la presencia en el aire de sustancias que implican riesgo de daño para la vida animal y vegetal así como los bienes de cualquier naturaleza.

Por ello, cuando estas materias ponen en peligro la salud del hombre, su bienestar o recursos, directa o indirectamente, se los denominan **contaminantes ambientales**. Los contaminantes ambientales pueden ser clasificados en:

- Primarios
- Secundarios

- *Contaminantes primarios*, son sustancias vertidas directamente a la atmósfera desde los focos emisores, los que pueden ser:

Gaseosos

- ✓ Dióxido de AzufreSO₂
- ✓ Monóxido de Carbono.....CO
- ✓ Óxidos de Nitrógeno..... NO_x
- ✓ Hidrocarburos..... HC

No gaseosos

- ✓ Líquidos: Hidrocarburos inquemados
- ✓ Sólidos: Partículas en suspensión: de 0 a 10 micrones de diámetro, y por tanto volátiles y partículas sedimentables: de diámetro superior a 10 micrones, al ser más pesadas tienden a depositarse sobre los elementos o el suelo.

- *Contaminantes secundarios*, no son vertidos directamente a la atmósfera y se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas o fotoquímicas que sufren los contaminantes primarios en la misma.

Contaminación del Agua

La tierra es conocida como el “planeta azul” por la gran cantidad de agua que hay en ella, pero el 94% de esa agua es salada, y sólo el 3% es dulce y aprovechable.

El agua puede ser contaminada por:

- ✓ Desperdicios industriales calientes, que son arrojados a ríos y lagos aledaños, que hacen que la solubilidad del O₂ disminuya y hace que el medio ya no resulte adecuado para la vida acuática.
- ✓ Pesticidas,
- ✓ Detergentes,
- ✓ Derrames de petróleo,
- ✓ Residuos sólidos de plantas industriales que son arrojados al mar, entre otros.

Contaminación de Suelos

La contaminación del suelo es la alteración de su equilibrio natural, debido a la aplicación de técnicas inadecuadas, al amontonamiento de desechos, a la urbanización, al abuso en la cantidad y la frecuencia del uso de venenos contra plantas e insectos indeseables, derrames de petróleo y borras (que son el producto final del procesamiento del petróleo y que no tiene ninguna utilización posible) que son enterradas provocando una contaminación de los suelos.

2.4.2 La Combustión como generador de Contaminación Atmosférica

Los combustibles fósiles son mezclas de composición variable formadas principalmente por hidrocarburos. Son usados para liberar energía, antes que para formar compuestos químicos nuevos. En general, una gran cantidad de CO₂ es producido en los motores de combustión. Veamos la reacción de combustión de la gasolina (recordemos que esta puede representarse como iso-octano):



De esta reacción se calcula que:

1 galón de gasolina (3,785 litros) produce más de 4 000 l CO₂ y cada año se lanzan a la atmósfera 80 millones de toneladas de CO₂ (¡una enorme cantidad!). Además, los combustibles en general, tienen impurezas que en la combustión producen óxidos como contaminantes atmosféricos adicionales.

La combustión incompleta de hidrocarburos produce sustancias tóxicas o indeseables, entre ellas el CO y carbono elemental (hollín), los que contaminan el aire, y por ende a los seres vivos.

2.4.3 Calentamiento global o Efecto Invernadero

Un problema ambiental importante lo constituye el “*calentamiento global*” o “*efecto invernadero*” que se produce como consecuencia de la emisión de gases de invernadero a la atmósfera como el dióxido de carbono (CO₂), dado que sus efectos tienden a alterar los ecosistemas actuales.

El calentamiento global de la tierra se debe a la absorción de calor por efecto de la radiación luminosa que llega procedente del sol, atravesando el aire atmosférico. A la vez, parte de ese calor absorbido es reenviado por la tierra al espacio exterior en forma de radiación infrarroja no visible, pero la atmósfera tiene la propiedad de no dejarla pasar, reteniendo de esa manera casi el 90% del calor que se perdería y por ello, realiza un efecto regulador del calor captado, manteniendo una temperatura superficial promedio global de aproximadamente 15°C que permite el desarrollo de la vida humana. Este calor que queda almacenado dentro del recinto, resulta beneficioso en invierno y se usa en los invernaderos para el cultivo de plantas.

Pero ocurre que *la concentración de CO₂ y en menor proporción los otros gases invernadero* (metano, clorofluorocarbonos, ozono, óxido nitroso y vapor de agua), *han crecido rápidamente en los últimos años* debido a la alta emisión y de esa forma, la energía calorífica almacenada tiende a producir un aumento de la temperatura promedio de la tierra y como consecuencia, se están originando

cambios climáticos que modifican los ecosistemas; este es el fenómeno llamado “*Efecto Invernadero*”, siendo la principal fuente de CO₂ la combustión en procesos industriales.

Este aumento de temperatura se traduce en alteraciones del equilibrio ecológico por mayores niveles de evaporación, descongelamiento de las masas de hielo polares; la fusión del hielo polar que tiende a elevar el nivel de los mares, puede provocar la inundación de ciudades costeras.

¿Gas Natural: Contribuye su uso al efecto invernadero?

Una de las preocupaciones con respecto al uso del gas natural es que su principal componente, el metano, es un potente gas que contribuye al efecto invernadero. Se estima que “atrapa” el calor 21 veces más que el dióxido de carbono. Sin embargo, un estudio realizado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) concluyó que el saldo entre una reducción en las emisiones de dióxido de carbono y el aumento en las emisiones de metano, por el reemplazo de otras fuentes de energía con gas natural, es favorable para el ambiente. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC) ha incluido entre sus recomendaciones incrementar el uso del gas natural como fuente de energía.

De hecho, según el EIA en su informe “Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en los Estados Unidos 2000”, el 81.2 % de las emisiones de estos gases en Estados Unidos en el año 2000 se atribuyó directamente al dióxido de carbono producido por la quema de combustibles fósiles.

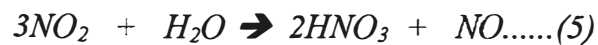
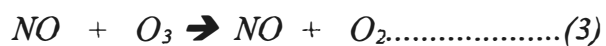
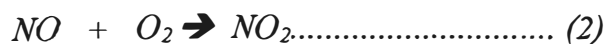
2.4.4 Lluvia Ácida

Algunas industrias o centrales térmicas que usan combustibles de baja calidad, liberan al aire atmosférico importantes cantidades de óxido de azufre y nitrógeno. En la atmósfera los óxidos de nitrógeno y azufre son convertidos en ácido nítrico y sulfúrico que vuelven a la tierra con las precipitaciones de lluvia o

nieve (lluvia ácida). Otras veces, aunque no llueva, van cayendo partículas sólidas con moléculas de ácido adheridas (deposición seca).

Las principales causas de lluvia ácida son los óxidos de nitrógeno y azufre que se generan al momento de la combustión; el nitrógeno lo aporta la atmósfera y no hay forma de evitarlo, el azufre forma parte de los combustibles, eliminarlo completamente es muy costoso; la lluvia ácida y la niebla ácida estarán con nosotros dañando todo lo que toquen, tanto en el campo como en la ciudad. Estos compuestos en forma de gotas de lluvia y de niebla son de corta vida, pronto reaccionan con algo orgánico e inorgánico, al reaccionar se consumen pero dejan un daño que puede ser irritación de mucosas en humanos y animales o deterioro en la cutícula de las hojas de los vegetales, en ambos casos, dando entrada a patógenos y reduciendo la producción agrícola.

Se cree que estos ácidos se forman a partir de los contaminantes primarios como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno por las siguientes reacciones:



La oxidación adicional de los óxidos de azufre (1) y de nitrógeno (2) puede ser catalizada por los contaminantes atmosféricos (3), incluyendo las partículas sólidas y por la luz solar. Una vez formados los óxidos SO_3 y NO_2 , reaccionan con facilidad con la humedad atmosférica para formar los ácidos sulfúrico (4) y nítrico (5) respectivamente.

Se ha medido el grado de acidez del agua de lluvia en zonas donde existía una elevada concentración de ciertos contaminantes y se ha visto que su pH es

mucho más bajo de lo normal, de hecho algunas lluvias llegan a tener pH del orden de 4,2-4,3, lo que indica un grado de acidez muy alto. Esto es lo que conocemos con el nombre de “lluvia ácida”, denominación con la que se designa cualquier agua de lluvia de pH inferior al natural de 5,5.

Los óxidos de azufre se emiten al quemar combustibles de baja calidad, que contienen azufre, en general son carbones o fracciones pesadas del petróleo. La producción de óxidos de nitrógeno depende de las condiciones en que se lleva a cabo la combustión, especialmente de la temperatura alcanzada. Tengamos en cuenta que los procesos de combustión son unos de los que más habitualmente efectuamos, tanto a nivel doméstico (calefacciones), como a nivel industrial (obtención de energía eléctrica por vía térmica, combustiones en calderas,) y que los medios de transporte, individuales y colectivos, incorporan motores en los que se queman combustibles de mejor o peor calidad.

Los mayores efectos de la lluvia ácida son:

- ✓ Toxicidad directa o indirecta sobre plantas
- ✓ Efectos respiratorios sobre el hombre
- ✓ Acidificación de las aguas con el consiguiente efecto sobre los peces que en ellas viven
- ✓ Corrosión de estructuras.

III. Desarrollo del Tema

3.1 Objetivos

Las ventajas que ofrece el gas natural sobre otras fuentes de energía ha hecho que su utilización siga una curva ascendente desde aproximadamente 20 años y en la actualidad representa más del 20% de la energía que se consume en el mundo.

El gas natural presenta diferentes ventajas con respecto al uso de otros combustibles, tenemos ventajas técnicas, ambientales y ventajas económicas.

Ventajas Técnicas: Estas ventajas se derivan de las características del gas, especialmente de su estado físico, de su pureza y, de una manera particular de la ausencia de azufre.

Ventajas Ambientales: Las emisiones de contaminantes por parte del sector industrial y las generadoras de energía contribuyen en gran proporción a la contaminación ambiental. En esta era de combustibles fósiles, el gas natural juega un papel importante y directo en la solución de los principales problemas medioambientales. La utilización del gas natural aportará mejoras rentables en la calidad del medio ambiente.

Ventajas Económicas: El uso del gas natural como combustible posee grandes ventajas al compararse con otros combustibles, que reflejados en una evaluación económica deben cuantificarse para facilitar una decisión que determina su uso como energético. Es importante analizar los beneficios económicos del uso de gas natural como combustible desde dos aspectos: el primero los beneficios propios de su uso derivado de sus propiedades y segundo los beneficios por diferencia de precio con respecto a los restantes combustibles.

Los criterios de evaluación en el análisis de un combustible son:

- Costos de operación (Servicios industriales y aditivos)
- Costo de Mantenimiento
- Costo por manejo de inventario de combustibles líquidos
- Costo ambiental

Para el caso del Perú el costo por unidad energética del gas natural es más bajo que los restantes combustibles a utilizar en el sector industrial, por esta razón existe un beneficio por facturación que incide de manera importante en la decisión del sector en adaptarse al uso del gas natural, esta diferencia ayuda a recuperar en poco tiempo la inversión que se realiza al adaptar el equipo al uso de gas natural como combustible.

Antes de analizar las ventajas que presenta el gas natural como combustible industrial, veamos el siguiente análisis comparativo del Gas Natural con otros combustibles industriales realizado por el Ing. Percy Castillo Neira.

Análisis Comparativo del Gas Natural con otros combustibles industriales

Al tener que competir el gas natural con otros combustibles en la práctica industrial, para constituir la mejor opción de suministro energético en términos técnicos y económicos, resultará de la mayor importancia disponer de criterios adecuados de comparación de las características que condicionan su disponibilidad, suministro, precombustión, combustión, y post-combustión.

Los combustibles que podríamos considerar alternativas elegibles para efectuar una comparación adecuada y útil en la práctica son, además del gas natural, el Gas Licuado de Petróleo (GLP), Diesel 2, Petróleo Residual 6 (Bunker C), carbón mineral.

Para realizar una comparación objetiva hemos elegido un sistema consistente en la designación de 10 parámetros de comparación vinculados

directamente con los circuitos de combustión industrial usados básicamente en calderos pirotubulares, elaborando con ellos un cuadro de valoración con calificación de 1 a 5, correspondiendo el valor más alto a su mejor comportamiento.

De esta forma, se tendrá un factor de utilización de cada uno de los combustibles que constituyan alternativas elegibles para una determinada planta industrial. Este factor de carácter técnico deberá compararse directamente con su costo de empleo, permitiendo definir opciones.

Los 10 parámetros elegidos son los siguientes:

1. *Suministro*: Involucra las posibilidades de adquisición, seguridad de suministro y la forma de facturación. La disponibilidad de gas natural por tubería y la facturación posterior al consumo marcan una excelente calificación al gas natural. El suministro de combustibles líquidos, incluyendo como tal al GLP resulta una posición intermedia y las dificultades propias del suministro de carbón le otorgan una baja calificación al mismo.
2. *Precombustión*: Se refiere al circuito de preparación de los combustibles y todo el circuito de pre-combustión, desde su ingreso a planta hasta el momento mismo de su ignición. También en este campo la ventaja de manipuleo del gas resulta decisiva, no requiriendo ningún acondicionamiento para su empleo en los quemadores. En la misma forma, los líquidos representarán una condición intermedia, con ligera ventaja para el GLP por utilizarse como gas. La molienda y/o clasificación por tamaños del carbón y las dificultades para transportar sólidos, le otorgan mucha desventaja a los carbones.
3. *Inversión*: Incluye todo el circuito de pre-combustión, quemadores, sistemas de seguridad y regulación, registro de parámetros de combustión

y post-combustión. También la inversión resulta definida totalmente por la simplicidad del manejo, y en este sentido, el gas resulta favorecido con la máxima calificación con un pequeño castigo, por requerir especiales condiciones de seguridad en toda la instalación (como válvulas especiales y sistemas automáticos de control y manejo).

4. *Mantenimiento*: La facilidad de desarrollar un efectivo mantenimiento también resultará influenciado por la simplicidad de las instalaciones. En este caso el GLP pierde las ventajas de utilizarse como gas debido a la necesidad del vaporizador y las posibilidades de depósitos de olefinas.
5. *Control sobre la llama*: Aunque la facilidad de inyección del gas natural y su energía cinética representan una gran posibilidad, ésta aparente ventaja resulta reducida por el escaso aprovechamiento del impulso del gas y los requerimientos de llamas más emisivas para algunos procesos, exigiendo al diseño del quemador la posibilidad de demorar la combustión. Los combustibles bien atomizados permiten un buen control sobre las características de la llama. En la combustión sobre parrillas, adecuado para el carbón mineral, el manejo de llama resulta muy limitado, pero factible de conseguir.
6. *Limpieza*: La presencia de residuos de combustión resulta determinante para juzgar su comportamiento en los equipos, resultando ideal en el caso del gas natural y parecido en el GLP; los combustibles líquidos se complican algo en el caso de los petróleos residuales y se tornan mas complicados en el caso de los carbones con cenizas variables.
7. *Emisividad de llama*: Parámetro importante en la practica por establecer las condiciones para transferencia de calor a los equipos y procesos. En este caso la facilidad de combustión del gas natural representa una desventaja compensable solo en forma limitada por el diseño del

quemador. La emisividad es mayor en forma proporcional al incremento de la relación carbono / hidrógeno, llegando al punto máximo la alta emisividad de llamas de carbón.

8. *Volumen de gases de combustión:* También la relación carbono / hidrógeno resulta definitiva en este caso, como se apreció anteriormente, y resulta importante para las posibilidades de transferencia de calor por convección. Para producir la misma cantidad de calor en condiciones estequiométricas se generan con gas natural 18.5% más gases que con carbón mineral y 12.2% mayor volumen de gases que con petróleo residual 6.
9. *Seguridad:* La circunstancia de que el gas natural no pueda percibirse por la vista o el olfato determina ciertos riesgos que afectan al gas natural y al GLP, con el agravante de este último de resultar más pesado que el aire. En este caso las mayores ventajas las tiene el Diesel 2 y Residual 6, resultando menos seguras las condiciones de manejo del carbón, debido al riesgo de explosiones del polvo de carbón en suspensión.
10. *Contaminación ambiental:* La limpieza y facilidad para quemarse marcan una diferencia notable en el uso de gases, menor en el caso del GLP, diesel 2, residual y carbón sucesivamente. (Se considera la necesidad de conseguir siempre combustión completa).

En la **Tabla 6** se presenta el resultado del análisis efectuado, en el cual se obtiene las siguientes puntuaciones:

Tabla_6 Análisis Comparativo de Combustibles Industriales

Nº	Parámetros	Gas Natural	G.L.P.	Diesel 2	Residual 6	Carbón Mineral
1	Suministro	5	4	4	3	1
2	Pre-combustión	4	3	3	2	1
3	Inversión	5	3	4	3	1
4	Mantenimiento	4	3	3	2	1
5	Control de llama	4	3	4	4	1
6	Limpieza	5	4	3	1	2
7	Emisividad de llama	1	2	3	4	5
8	Volumen gases de combustión	2	3	3	4	4
9	Seguridad	4	3	4	3	3
10	Contaminación ambiental	5	4	4	2	2
Total		39	32	35	28	21

De acuerdo con este resultado el precio de facturación de estos cinco combustibles resultarían opciones equivalentes, (tomando como base un precio de 3 US\$/MM BTU para el gas natural) si se tuvieran los siguientes precios^(*) en US\$/MM de BTU

Combustible	Puntos	Precio ^(*) US\$/MMBTU	Precio Real ^(**) US\$/MMBTU
Gas natural	39	3.00	3.85
GLP	32	2.46	21.63
Diesel 2	35	2.69	21.73
Residual 6	28	2.15	7.68
Carbón Mineral	21	1.62	---

*(**) Precios actualizados a Octubre del 2004*

Para poder aplicar este modelo con mayor objetividad, tendrá que establecerse un valor específico que corresponda a cada parámetro para cada uso particular de los combustibles en plantas industriales.

Así, su aplicación en el caso de una industria textil que utiliza procesos a relativamente baja temperatura, con mayor utilización de transferencia de calor por convección otorgara menor importancia a la emisividad de llama y mayor a la

limpieza que hace factible el empleo de gases de combustión en forma directa para calentamiento y secado.

En la industria del cemento, por el contrario, resultará fundamental la emisividad de llama y menos importante la limpieza, dado que las cenizas serán parte del producto.

Resulta importante observar que existiendo siempre una ventaja respecto al uso del gas natural frente a los otros combustibles, lo que establecería un margen de conveniencia de su empleo aún si su precio fuese mayor en diferentes niveles respecto a los otros combustibles industriales, en la práctica, el hecho de que resulte impracticable su almacenamiento, cuando no existen problemas de escasez, establece precios normalmente inferiores para el gas natural. Esta situación permite apreciar claramente la gran conveniencia técnica y económica del gas natural.

3.2 Ventajas del Gas Natural

En el momento de elegir por un combustible a usar se deben tener en cuenta las ventajas que éste presente, aquí se detallan las ventajas que presenta el gas natural frente a otros combustibles a nivel industrial.

3.2.1 Ventajas Técnicas

Aunque la elección del combustible utilizado en un generador de vapor no tenga influencia técnica sobre la producción, su incidencia sobre numerosos factores pueden variar muy sensiblemente de un combustible a otro. A este respecto, las ventajas específicas propias del gas lo colocan en una situación favorable.

Dichas ventajas, respecto a los combustibles sólidos y líquidos son los siguientes:

- Ausencia de almacenamiento del combustible en el exterior o interior de la sala de calderas
- El caudal de combustible, fácilmente medible, permite una regulación sencilla del aire de combustión en función de aquel.
- La mezcla aire/gas puede realizarse íntimamente con un débil exceso de aire, asegurando una combustión completa y mejorando el rendimiento térmico.
- No hay deposición, ni formación de depósitos adherentes en las superficies de intercambio de calor de la caldera, mejorando la transmisión de calor de las partes metálicas y no aumentando la resistencia del circuito de gases.
- No hay formación de cenizas de ninguna forma sólidas, líquidas, fundidas (escorias) o volantes. Todos los dispositivos de recuperación y de evacuación pueden suprimirse. La combustión de gas no poluciona ni contamina la atmósfera.
- Siendo la proporción de azufre prácticamente nula, no tiene que existir corrosiones en la parte final de la caldera.

3.2.2 Ventajas Ambientales

El gas natural es un combustible muy limpio comparado con los combustibles tradicionales lo que facilita el cumplimiento de exigentes normas ambientales. El cambio de otros combustibles fósiles a gas natural puede garantizar la reducción de las emisiones nocivas al aire, al agua, y a la tierra.

Una de las grandes ventajas del gas natural respecto a otros combustibles, es la baja emisión de contaminantes en su combustión.

Para entender mejor sobre las emisiones producidas por los distintos combustibles se presenta un cuadro comparativo (*Tabla_7*).

Tabla 7 Emisión de Contaminantes de Combustibles

(en términos del consumo energético)

Combustible	MP Material Particulado	SOx Óxidos de Azufre	NOx Óxidos de Nitrógeno
Gas Natural	1	1	1
GLP	1,4	23	2
Kerosene	3,4	269	1,5
Diesel	3,3	1 209	1,5
Residual N° 5	15	4 470	4
Residual N° 6	39,4	4 433	4
Carbón	157	5 283	6

Fuente: Innergy soluciones.

El gas natural es el combustible fósil con menor impacto medioambiental de todos los utilizados, tanto en la etapa de extracción, elaboración y transporte, como en la fase de utilización.

Emisiones de CO₂: Los principales productos de la combustión de un combustible fósil son el CO₂ y el vapor del agua. La combustión de combustibles fósiles es la causa del 75-90% de todas las emisiones de CO₂ producidas por la actividad humana.

Es opinión generalizada que las emisiones de CO₂ constituyen la contribución más importante a la posibilidad de aumento del calentamiento global de la tierra, representando más de las dos terceras partes de la contribución total del hombre a este problema. El resto es debido al aumento de los niveles de metano, óxido nitroso y otros compuestos, tales como los clorofluorocarbonados (CFC's) y halones, que se han añadido a las causas de inquietud sobre el potencial calentamiento global de la tierra.

En base a los datos más recientes presentados por el "Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)" se concluye que la contribución relativa sobre el posible aumento del efecto invernadero de las emisiones causadas por la

actividad humana son las siguientes: Los principales gases invernadero se estima que son: dióxido de carbono (CO₂, 68%), metano (CH₄, 19%), óxido nitroso (NO₂, 7%) y compuestos clorofluorocarbonados (CFC's, 6%).

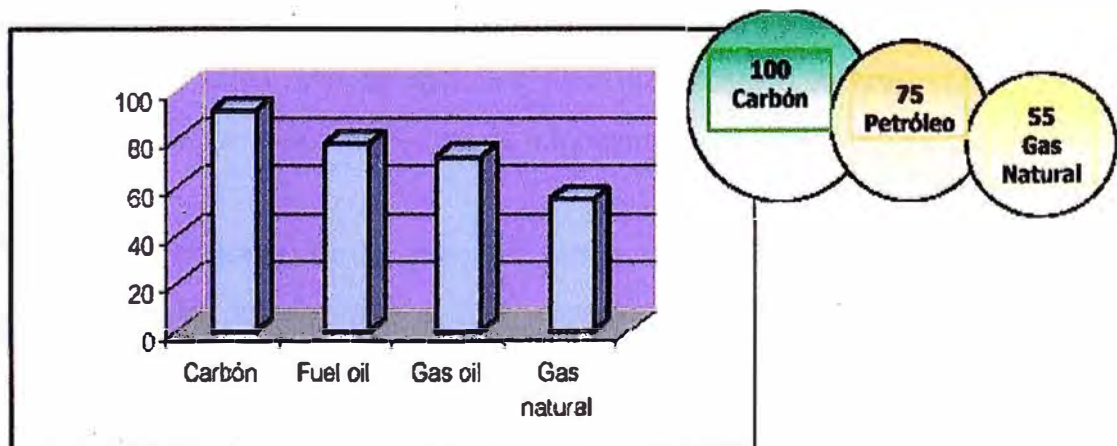
Dada la menor relación carbono / hidrógeno en la composición del gas natural en comparación con otros combustibles fósiles, su combustión produce considerablemente menos CO₂ por unidad de energía producida.

En base a esto, la combustión de gas natural produce como mínimo un 25-30 % menos CO₂ que la del petróleo y al menos un 40-50% menos que la del carbón por unidad de energía producida, dependiendo del proceso que se utiliza y la calidad del combustible.

Cuando se tienen en cuenta el alto rendimiento en la combustión y las tecnologías de utilización del calor desarrolladas para el gas natural, las emisiones de CO₂ por unidad de energía útil producidas por combustión de gas natural comparadas con las del carbón o petróleo se reducen todavía más.

En la *Figura_10* se muestra la cantidad relativa de emisiones de CO₂ que produce en su combustión el gas natural, el petróleo y el carbón, en base al valor 100% del carbón.

Figura_10 Emisiones de CO₂



Emisiones de NOx: Los óxidos de nitrógeno se producen en la combustión al combinarse radicales de nitrógeno, procedentes del propio combustible o bien, del propio aire, con el oxígeno de la combustión. Este fenómeno tiene lugar en reacciones de elevada temperatura, especialmente procesos industriales y en motores alternativos, alcanzándole proporciones del 95-98% de NO y del 2-5% de NO₂.

Dichos óxidos, por su carácter ácido, contribuyen junto con el SO₂ a la lluvia ácida y a la formación del "smog" (término anglosajón que se refiere a la mezcla de humedad y humo que se produce en invierno sobre las grandes ciudades).

La naturaleza del gas (su combustión tiene lugar en fase gaseosa) permite alcanzar una mezcla más perfecta con el aire de combustión lo que conduce a combustiones completas y más eficientes, con un menor exceso de aire. La combustión del gas natural, ofrece tecnología de quemadores de bajo NOx que pueden reducir significativamente las emisiones de estos gases en comparación con la combustión de fuel oil y carbón.

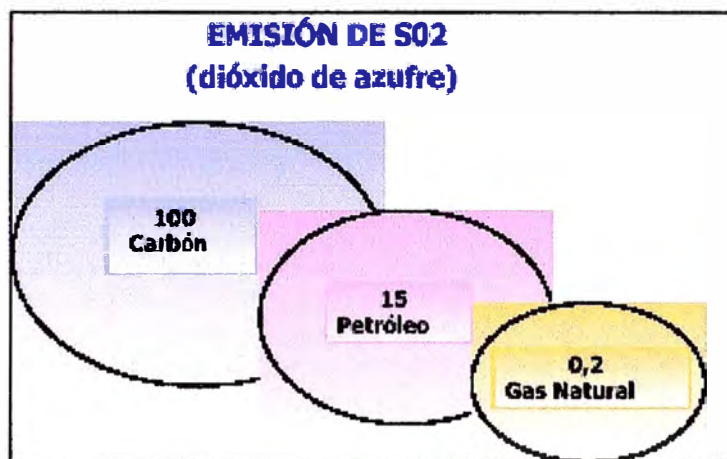
Las modernas instalaciones tienden a reducir las emisiones actuando sobre la temperatura, concentración de nitrógeno y tiempos de residencia o eliminándolo una vez formado mediante dispositivos de reducción catalítica.

Emisiones de SO₂: Se trata del principal causante de la lluvia ácida, que a su vez es el responsable de la destrucción de los bosques y la acidificación de los lagos. El gas natural, salvo raras excepciones, tiene un contenido en azufre inferior a las 10ppm (partes por millón) en forma de odorizante.

Las emisiones de la principal fuente de lluvia ácida pueden reducirse convirtiendo las instalaciones a fuel y carbón de bajo contenido de azufre e instalando procesos de desulfuración, pero pueden ser prácticamente eliminadas convirtiendo a gas natural.

En la *Figura_11* se muestra la cantidad relativa de emisiones de SO_2 que produce en su combustión el gas natural, el petróleo y el carbón, en base al valor 100% del carbón.

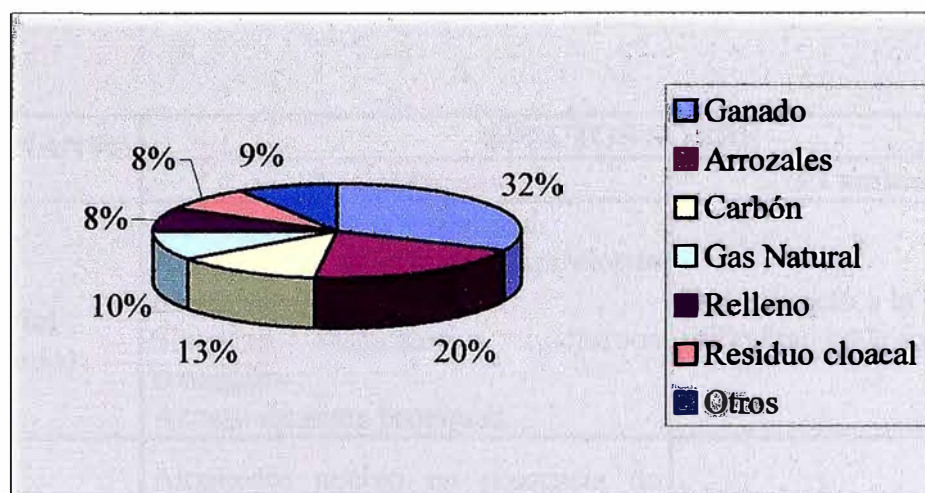
Figura_11 Emisiones de SO_2



Emisiones de CH_4 : El gas natural está compuesto principalmente por metano (normalmente entre 80-99% en volumen, dependiendo de la procedencia). El metano es un gas invernadero más potente que el CO_2 molécula a molécula, pero por otro lado, las moléculas de metano tienen períodos de vida mucho más cortos que el tiempo de residencia en la atmósfera del CO_2 .

Hay más incertidumbre a nivel cuantitativo acerca de las emisiones de metano y sus causas que en el caso del dióxido de carbono. De acuerdo con el IPCC, las dos fuentes principales de emisiones de metanos causadas por la actividad humana son la ganadería y los arrozales, suponiendo entre ambas alrededor de la mitad de todas las emisiones de metano. Otras fuentes importantes son la minería de carbón, las industrias del petróleo y del gas, la combustión de biomasa, los vertederos y el tratamiento de residuos urbanos. La distribución de emisiones de metano es aproximadamente tal como se muestra en la *Figura_12*.

Figura_12 Emisiones de Metano



Como el nivel de fugas real (0,7% de la producción) en los sistemas de gas natural es como mínimo de un orden de magnitud inferior que los porcentajes de equilibrio calculados, los beneficios medioambientales del gas natural respecto de otros combustibles fósiles superan claramente al impacto de las fugas de metano de la industria del gas natural sobre el efecto invernadero.

Partículas sólidas: El gas natural se caracteriza por la ausencia de cualquier tipo de impurezas y residuos, lo que descarta cualquier emisión de partículas sólidas, y además permite en muchos casos el uso de los gases de combustión de forma directa o el empleo en motores de combustión interna.

Efectos de Algunos contaminantes que se encuentran en los gases de combustión

Se tiene la **Tabla_8**, detallando los efectos de algunos contaminantes que se encuentran en los gases de combustión, sobre las personas y el medio ambiente

Tabla_8 Resumen de Efectos de Distintos Contaminantes Sobre la Salud de las Personas y en el Ambiente

CONTAMINANTE	EFECTOS SOBRE	
	Las personas	El ambiente
MP (Material Particulado)	Disminución de la visibilidad. Aumento de afecciones respiratorias crónica, ronquera. Síntomas respiratorios nocturnos bronquitis Acceso de asma bronquial	Daño directo a la vegetación (dificultad en la fotosíntesis)
SO₂ (Dióxido de Sulfuro)	Altamente nocivo en presencia de humedad	Lluvia ácida
NO_x (Óxidos de Nitrógeno)	Irritante. Potencialmente cancerígeno	Lluvia ácida Efecto Invernadero

Fuente: Según el estudio del Banco Mundial "World Development Report".

3.2.3 Ventajas Económicas

Uno de los factores de mayor relevancia a la hora de decidir acerca del uso de un combustible en un proceso industrial, es el costo generado por su utilización.

Se analizará los beneficios económicos del uso del gas natural como combustible desde dos puntos de vista. Los beneficios derivados de sus propiedades, los cuales permiten un manejo más simple que otros combustibles, y los asociados con el menor precio del gas natural frente a otros combustibles tradicionales en el Perú (como el Residual, Diesel y GLP).

3.2.3.1 Por Uso del Gas Natural en razón a sus Propiedades

A continuación se desarrolla una evaluación comparativa del uso del gas natural vs. residual 6 para una empresa que recién inicia sus operaciones y que está próxima al ducto de alimentación de gas. Cada una de las variables evaluadas se deriva de las propiedades de los combustibles para su uso como combustible.

a) Costos de Operación (Servicios Industriales y Aditivos)

Para el consumo de gas natural no se consideran costos por servicios industriales y aditivos, lo que si ocurre cuando se usan combustibles líquidos residuales como el fuel oil.

Para una caldera de 300 BHP tipo piro tubular con consumo de 80.7 GPH de Residual 6 y con factor de servicio de 0.6 (100 horas de operación por semana), se requiere un almacenamiento para manejo de inventario de 15 días, de una capacidad de 18000 galones. De igual manera se requiere un tanque para suministro diario del combustible con calentamiento, de una capacidad de 1200 galones.

Equipo de bombeo requerido: 1 bomba de 1HP y otra de 3HP, especificadas para fluidos viscosos y temperaturas superior a 150° F. (Caso Residual 6).

Sistema de Calentamiento: Para el caso del uso de crudos pesados o combustóleo se requiere un calentador eléctrico y/o a vapor que garantice una temperatura de 80° C en el quemador.

El sistema de suministro requiere filtros que eliminen arrastre de sólidos a los quemadores.

En la *Tabla_9* se muestra las especificaciones de consumo y producción de calderas piro tubulares.

Tabla_9 Especificaciones de consumo y producción de calderas piro tubulares.

Caldera BHP	Producción de Vapor lb / hr	Carga Térmica MMBTU /hr	Potencia de Bombeo HP	Potencia de Atomización HP
60 – 150	2070 – 5175	2.01 – 5.02	1	1
150 – 300	5175 – 10350	5.02 – 10.0	1	2
300 – 350	10350 – 12075	10.0 – 11.7	1	3
350 – 400	12075 – 13800	11.7 – 13.4	1.5	4
400 – 700	13800 – 24500	13.4 – 23.4	1.5	5

Para la evaluación de costos considerar los anexos a este trabajo, allí encontraran las conversiones que se requiera para los cálculos.

Costos de calentamiento del Residual 6

El calor requerido para llevar el Residual 6 de la temperatura de 40 °C (temperatura de recepción del combustible) a la temperatura de 80 °C para la obtención de la viscosidad del combustible especificado por el quemador, se calcula mediante el siguiente procedimiento:

$$Q_{calent} = W \times C \times \Delta T$$

C : Coeficiente calórico del residual 6 = 0.53 BTU / lb-°K

W : Cantidad másica de residual 6 por galón: 7.9 lbs / galón

ΔT : Diferencia de temperatura, °K

$$Q_{calent} = 7.9 \text{ lb/gal} * 0.53 \text{ BTU/lb } ^\circ\text{K} * (353 - 313)^\circ\text{K} = 167 \text{ BTU/gal}$$

Precio KWH Industrial : US\$ 0.12

$$\text{Costo : } \frac{167 \text{ BTU/gal} * \text{US\$ } 0.12 / \text{KWH}}{3413 \text{ BTU/KWH}} = \text{US\$ } 0.0059 / \text{galón}$$

Para la caldera de 300 BHP y factor de servicio de 0.6 tenemos

$$\text{Costo calentamiento} = 80.7 \text{ gal / hr} * 432 \text{ hr / mes} * \text{US\$ } 0.0059 / \text{gal}$$

$$\text{Costo calentamiento} = \text{US\$ } 205 / \text{mes}$$

Costos de calentamiento para facilitar la atomización del combustible

Por calentamiento del combustible:

$$Q = W C \Delta T$$

Rango de calentamiento : 80 °C a 100 °C

$$Q = 7.9 \text{ lb / gal} * 0.53 \text{ BTU / lb } ^\circ\text{K} (373 - 353) ^\circ\text{K} = 83.7 \text{ BTU / gal}$$

$$\text{Costo / Galón} = \frac{83.7 \text{ Btu / gal} * \text{US\$ } 0.12 / \text{KWH}}{3413 \text{ BTU / KWH}} = \text{US\$ } 0.003/\text{galón}$$

$$\text{Costo} = 80.7 \text{ gal / hr} * 432 \text{ hr / mes} * \text{US\$ } 0.003 / \text{gal}$$

$$\text{Costo} = \text{US\$ } 105/\text{mes}$$

Costo de energía de atomización

Según la **Tabla_9** el consumo de potencia para la atomización del residual 6 en una caldera de 300 BHP es de 3 HP.

$$\text{Costo Atomización} = 3 \text{ HP} * 0.746 \text{ KW / HP} * \text{US\$ } 0.12 / \text{KWH}$$

$$\text{Costo Atomización} = \text{US\$ } 0.27 / \text{hora} * 432 \text{ hr / mes}$$

$$\text{Costo Atomización} = \text{US\$ } 117 / \text{mes}$$

Costo por bombeo del combustible líquido

Según la **Tabla_9**, el consumo de potencia de bombeo para una caldera de 300 BHP que usa residual 6 es de 1 HP.

$$\text{Costo Bombeo} = 1 \text{ HP} * 0.746 \text{ KW / HP} * \text{US\$ } 0.12 / \text{KW.H}$$

$$\text{Costo Bombeo} = \text{US\$ } 0.09 / \text{hora}$$

$$\text{Costo Bombeo} = \text{US\$ } 0.09 / \text{hr} * 432 \text{ hr / mes}$$

$$\text{Costo Bombeo} = \text{US\$ } 39 / \text{mes}$$

Costo de Aditivos

Los crudos pesados y el fuel oil en oportunidades requiere aditivos mejoradores de combustión y homogenizadores para evitar su estratificación por temperatura y tiempo de almacenamiento, con ello se garantiza una combustión correcta.

Dosificación del aditivo: 1 galón de aditivo por 4000 galones de residual 6

Consumo de combustible: 80.7 gal /hr

Consumo de aditivo = 80.7 gal /hr * 432 hr /mes * 1 gal aditivo / 4000 gal

Consumo de aditivo = 8.72 gal / mes

Costo promedio del galón de aditivo = US\$ 55.0

Costo aditivo por mes = 8.72 galones / mes * US\$ 55 /gal

Costo aditivo por mes = US\$ 479.6 / mes

Total costo por operación del fuel oil por mes US\$ 946 /mes

b) Costos de Mantenimiento

Los requerimientos de una caldera que consume Residual 6 respecto al mantenimiento comparado con el gas natural se muestra en la *Tabla_10*.

Tabla_10 Mantenimiento preventivo de una caldera.

Residual Vs. Gas Natural

Actividades para el Mantenimiento	Tipo de combustible	
	Residuales	Gas Natural
Control de la combustión y la eficiencia	Quincenal	Semestral
Limpieza y verificación del filtro del combustible	Quincenal	Semestral
Limpieza y verificación de electrodos	Quincenal	Semestral
Limpieza y verificación de las boquillas	Quincenal	Semestral
Verificación de válvulas solenoides	Quincenal	Semestral
Verificación de presostatos	Quincenal	Semestral
Limpieza y verificación de mirilla	Quincenal	Semestral
Limpieza y verificación de platos reflectores	Quincenal	Semestral
Limpieza y verificación de fotocelda IR/UV	Quincenal	Semestral
Verificación del programador de llama	Quincenal	Semestral
Verificación del transformador de encendido	Quincenal	Semestral
Verificación de la presión del combustible	Diario	Diario
Limpieza de chimeneas y ductos de gases	Semestral	Anual

Recomendado por fabricantes de quemadores.

Fuente: GASTECHNIC.

Los costos de mantenimiento están asociados a los costos del personal de mantenimiento asignado a la caldera y a lo relacionado con los costos de repuestos utilizados durante el mantenimiento.

Costo de mano de obra por mantenimiento

Para el análisis se tomará en cuenta el costo adicional en que se incurre al utilizar residual 6 como combustible, bajo la afirmación de que éstos son el doble de los costos que cuando se usa gas natural.

Para una caldera pirotubular de 300 BHP se tiene un mantenimiento programado cada 6 meses con una duración de cinco (5) días de inspección y mantenimiento, con una asignación de 2 mecánicos y un obrero laborando 9 horas / día.

Costo mano de obra incluyendo factor laboral (1.8)= US\$ 90 / día

Días requeridos para mantenimiento: 10 días / año = 0.83 días / mes

Costo de mantenimiento programado: US\$ 75 / mes

Costo de repuestos y materiales

En este renglón se tiene en cuenta la historia que posee el equipo de combustión en cuanto a repuestos requeridos en los últimos 3 años.

c) Costo por Manejo de Inventario de Combustibles Líquidos

Dada la necesidad de mantener inventarios mínimos de combustible líquido que aseguren el suministro ante contingencias de abastecimiento, se causa por este efecto unos costos que viene determinado por el interés del valor de dicho inventario.

Para una caldera de 300 BHP se debe mantener un inventario de 8 días de suministro cuando el punto de compra a entrega distante más de 300 km y con alta posibilidad de contingencias.

Volumen del inventario → $80.7 \text{ gph} \times 24 \text{ h/día} \times 0.6 \times 8 \text{ días} = 9300 \text{ galones}$

Costo del inventario → $9300 \text{ galones} \times \text{US\$ } 1.10 / \text{gal} = \text{US\$ } 10230$

Interés por manejo de inventario → $\text{US\$ } 10230 \times 1.0\%(\text{mensual}) = \text{US\$ } 102.3/\text{mes}$

d) Costo por Monitoreo Ambiental

El gas natural es un combustible limpio, amigable al medio ambiente, y por lo tanto no requiere equipos de tratamiento de los gases de combustión que garanticen el cumplimiento de las normas sobre emisiones por fuentes fijas en procesos de combustión. Las emisiones debidas al uso del residual 6 como combustible deben ser monitoreadas respecto a material particulado y componentes de azufre.

Para el caso colombiano el Decreto 1697 del 27 de Junio de 1997 en el párrafo quinto dice textualmente “Las calderas u hornos que utilicen como combustible gas natural o gas licuado del petróleo en un establecimiento industrial o comercial o para la operación de plantas termoeléctricas con calderas, turbinas o motores no requerirán permiso de emisión atmosférica”.

Costo por Monitoreo Ambiental por mes: \$ 113/mes para el caso de cuatro monitoreos al año. Aquí solo se consideran costos de monitoreo ambiental mas no de los tratamientos a dichas emisiones atmosféricas.

En resumen, veamos la **Tabla_11** que nos muestra las ventajas económicas que presenta el gas natural frente al uso de combustibles líquidos como el residual 6. No se incluyen los aspectos no cuantificados en esta evaluación.

Tabla_11 Cuadro Comparativo Residual 6 vs Gas Natural

Costos (US\$/mes)	Residual 6	Gas Natural
Calentamiento del Combustible	205	No requiere
Calentamiento para la atomización del Combustible	105	No requiere
Energía de atomización del Combustible	117	No requiere
Bombeo del Combustible	39	No requiere
Aditivos	480	No requiere
Costo por Operación	946	No requiere
Costo de Mantenimiento (Mano de Obra)	75	37.5
Costo Manejo de Inventarios del Combustible	102.3	No requiere
Costo por Monitoreo Ambiental	113	No requiere*
Costo Total Mensual	US\$ 1236.3	US\$ 37.5

* Considerando el caso colombiano detallado en la pagina 60.

Como se puede observar el Gas Natural presenta puntos a favor a la hora de estudiar la posibilidad de convertir un equipo que usa otros combustibles; viendo claramente que se tendría un ahorro, para este caso, de US\$ 1,198.8 mensuales.

La disponibilidad de gas natural representa para los calderos pirotubulares la oportunidad de una conversión que constituya un proyecto de alta rentabilidad si se concibe, plantea y ejecuta en la forma técnicamente correcta.

El gas natural simplifica la operación de calderos pirotubulares debiendo quitar equipos en vez de ponerlos y disminuir costos operativos en lugar de incrementarlos.

3.2.3.2 Por Uso del Gas Natural en razón a su Precio.

Se presentan la *Tabla_12* y *Figura_13* con los precios de los combustibles en el Perú.

Tabla_12 Precios de los Combustibles en el Perú

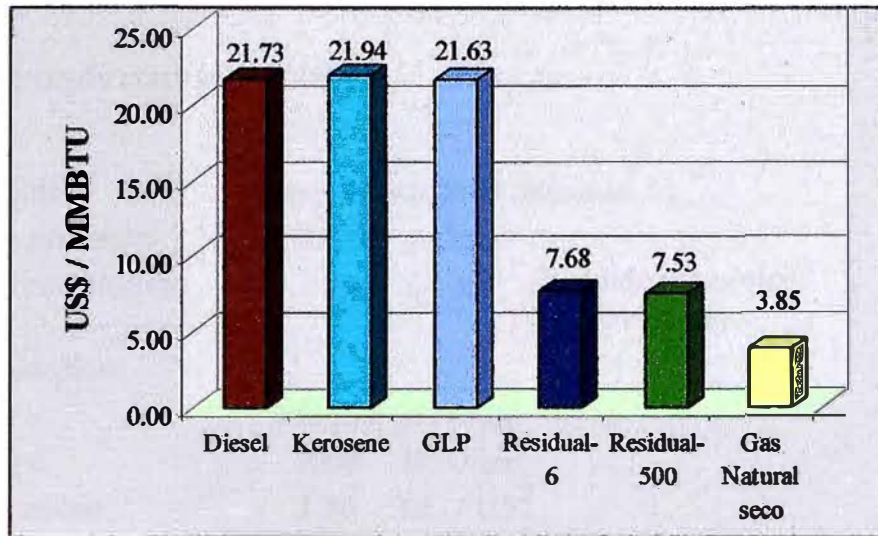
Combustible	Poder Calorífico (BTU/gal)	Precio * (US\$/gal)	Precio equivalente (US\$/MMBTU)
Diesel	131 036	2.85	21.73
Kerosene	127 060	2.78	21.94
GLP	97 083	2.10	21.63
Residual 6	143 150	1.10	7.68
Residual 500	143 421	1.08	7.53
Gas Natural seco**	1000 BTU/pie ³	-----	3.85

* Precio Ex-Planta Petroperu (vigente al 31-10-04).

**Precio Estimado – Osinerg (precio del gas + servicio de transporte y distribución).

Tipo de Cambio: S/. 3,30/US\$

Figura_13 Precios de los Combustibles en el Perú



Para el mismo caso que se viene evaluando tenemos:

Consumo de residual 6 por mes: 34 862 gal/mes

Factor de servicio de la caldera: 0.6

Precio del residual 6: US\$1.10/gal

Facturación Mensual de fuel oil: **US\$38 348/mes**

Precio del gas natural: US\$3.85/MMBTU

Consumo energético caldera por mes: 34 862 gal/mes * 143.150 BTU/gal fuel oil

Consumo energético caldera por mes = 4.99 MMBTU/mes

Poder calorífico del gas: 1.0 MBTU/pe³

Consumo equivalente de gas natural en la caldera: 4,990.0 MPC/mes

Facturación Mensual de gas natural: **US\$19 211/mes**

Beneficio económico del uso del gas natural:

US\$38 348/mes - US\$19 211/mes = US\$19 137/mes

Ahorro en la facturación mensual por uso de gas natural: US\$19 137/mes

2. Comparación con el Diesel.

Datos:

Combustible:	Diesel		
Consumo promedio:	50000	gal/mes	
Costo de combustible:	9.40	S./ gal	(Incluido impuestos, Octubre 2004)

Poder calorífico:

Diesel:	131036	BTU/gal
Gas natural:	1000	BTU/pie ³
Tipo de cambio:	3.30	S/. / US\$

Costo de combustibles :

Diesel:	21.74	US\$/MMBTU
Gas Natural :	3.85	US\$/MMBTU

Consumo / Gastos		Meses		
		1	6	12
Consumo actual de energía	MMBTU	6552	39311	78622
Gasto consumo Diesel	US\$	142424	854545	1709091
Gasto consumo Gas Natural	US\$	25224	151347	302693
Ahorro Acumulado	US\$	117200	703199	1406398
Ahorro anual por convertirse a gas natural				
US\$1,406,398				

Nota: El ahorro es solamente por consumo de combustible, no se consideran los gastos de mantenimiento que son más altos con diesel, ni la eficiencia en la combustión.

3. Comparación con el GLP.

Datos:

Combustible:	GLP		
Consumo promedio:	50000	gal/mes	
Costo de combustible:	6.93	S./ gal	(Incluido impuestos, Octubre 2004)

Poder calorífico:

GLP :	97083	BTU/gal
Gas natural:	1000	BTU/pie ³
Tipo de cambio:	3.30	S/ / US\$

Costo de combustibles :

GLP :	21.63	US\$/MMBTU
Gas Natural :	3.85	US\$/MMBTU

Consumo / Gastos		Meses		
		1	6	12
Consumo actual de energía	MMBTU	4854	29124.9	58249.8
Gasto consumo GLP	US\$	105000	630000	1260000
Gasto consumo Gas Natural	US\$	18688	112131	224262
Ahorro Acumulado	US\$	86312	517869	1035738
Ahorro anual por convertirse a gas natural				
US\$1,035,738.27				

Nota: El ahorro es solamente por consumo de combustible, no se consideran los gastos de mantenimiento que son más altos con GLP, ni la eficiencia en la combustión.

IV. Conclusiones y Recomendaciones

Se concluye que:

- ❖ Bajo las mismas condiciones, la combustión del gas natural cuenta con una combustión mucho más completa que el resto de hidrocarburos, gracias a su estructura molecular simple, por lo que se encuentra un paso adelante con respecto a las normativas de seguridad ambiental; no requiere mayores tratamientos para su utilización; y el equipamiento necesario para trabajar con el gas natural es de un mantenimiento fácil y económico.
- ❖ Debido a su naturaleza limpia, el uso del gas natural dondequiera que fuere posible, o junto con otros combustibles fósiles o en lugar de ellos, puede ayudar a reducir la emisión de contaminantes dañinos. Además, las reservas de gas natural son abundantes, y su transporte y distribución mediante tuberías enterradas hacen que su impacto sobre el paisaje sea mínimo.
- ❖ La sustitución de los combustibles fósiles líquidos y sólidos por gas natural, ofrece una alternativa más limpia que contribuye a la mejora de la calidad del aire en las ciudades y a una vida más limpia y saludable, además del precio altamente competitivo con el que se presenta en el mercado.
- ❖ El gas natural ofrece soluciones racionales para todos estos aspectos: es una fuente de energía limpia, fácilmente disponible, de bajos costos de operación y mantenimiento, y que brinda eficiencia y calidad. Estas cualidades hacen del gas natural una alternativa preferencial para todos los sectores usuarios: residencial, comercial e industrial.
- ❖ El gas natural es una fuente de energía limpia y segura; no obstante, se deben tener en cuenta normas de seguridad para su manipulación y para el mantenimiento de instalaciones y equipos. Es muy importante la capacitación del personal que está a cargo de dichas instalaciones.

- ❖ Con la evaluación de las ventajas económicas, se puede observar, que lo que se logra obtener es un ahorro considerable al utilizar gas natural como combustible, por ser un combustible de menor precio, que no requiere almacenamiento, preparación previa a su utilización, los equipos son fáciles de limpiar, el rendimiento del gas es mayor que al de otros combustibles.

Finalmente, al ver los beneficios que presenta el uso del gas natural, en este trabajo, como combustible en calderos industriales se espera la conversión de los equipos en las diferentes industrias nacionales, es sabido que la primera empresa que esta interesada en comprar el gas natural es ALICORP, luego BACKUS, CEMENTOS LIMA, Y ACEROS AREQUIPA, y así como ellas muchas otras lo usaran en un futuro no muy lejano.

V. Bibliografía

Para el desarrollo del presente informe, se uso el siguiente material bibliográfico:

- ❖ KIRK – OTHMER, Enciclopedia de Tecnología Química
Primera Edición en Español, Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americano
Tomo V, pags.517 – 526

- ❖ PERRY, Manual del Ingeniero Químico
Traducción de la sexta edición en Ingles, MCGRAW-HILL
INTERAMERICANA DE MEXICO, 1992
Tomo III, Sección 9

- ❖ ING. HERNANDO GALVIS BARRERA, Curso Internacional “Conversión de Equipos Industriales y Residenciales para su uso con Gas Natural”
Instituto de Petróleo y Gas IPEGA
3-7 Noviembre del 2003

- ❖ ING. PERCY CASTILLO NEYRA, Curso “Operación y Mantenimiento de Calderos Industriales”
Auspiciado por REPSOLYPF
9-10 Agosto del 2001

- ❖ ING. PERCY CASTILLO NEYRA , “Adaptación de Calderos al Empleo de Gas Natural” expuesto en el Seminario de “Operación y Control de Calderos Industriales” en TECSUP
23 –24 de Noviembre del 2000

- ❖ ING. PERCY CASTILLO NEYRA, Curso Practico “Combustión Industrial de Gas Natural” en Auditorio Petroperu
12-13 de Junio 2000

❖ Revistas:

- ✓ ING. PERCY CASTILLO NEYRA, ¿Corrosión o Lluvia ácida?, Combustión & Ecología, Año 1 N° 2 MAR-ABR 2002, pags. 34- 37
- ✓ ING. PERCY CASTILLO NEYRA, “La Combustión y el Efecto Invernadero”, Combustión & Ecología, Año 1 N° 1 ENE-FEB 2002, pags. 27 –29
- ✓ ING. PERCY CASTILLO NEYRA, “Técnicas de Ahorro Energético en la Operación de Calderos”, Combustión & Clinkerización, Año 5 N° 14 ENE-MAR 1999, pags.27-34

❖ Información obtenida de Internet

- ✓ <http://www.minem.gob.pe/hidrocarburos/publicaciones/gasnatural/gasindustrial.pdf>.
- ✓ <http://www.innergy.cl/ventajas1.htm>
- ✓ <http://www.acerosarequipa.com/downloads/capi1.pdf>
- ✓ <http://www.acerosarequipa.com/downloads/capi2.pdf>
- ✓ <http://www.acerosarequipa.com/downloads/capi9.pdf>
- ✓ http://html.rincondelvago.com/calor_energia-termica.html
- ✓ ⁽¹⁾ <http://r0.unctad.org/infocomm/espagnol/gas/descripc.htm>
- ✓ http://www.metrogas.com.ar/ecologia_comunidad.htm
- ✓ <http://www.agnchile.cl/ambiente/ambiente2.html>
- ✓ <http://www.agnchile.cl/ambiente/ambiente3b.html>
- ✓ <http://www.mineco.es/energia/hidrocarburos/gas/presentac.htm>
- ✓ <http://www.monografias.com/trabajos5/lluac/lluac.shtml>
- ✓ <http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/Proyecto/PublicacionesElectro/monografias/OPTIMIZACION%20DEL%20%20PROCESO%20DE%20ENDULZAMIENTO%20DEL%20GAS%20NATURAL.pdf>
- ✓ <http://www.acondicionamiento.com.ar/docs/Problemas%20ambientales.pdf>
- ✓ <http://www.camuzzigas.com/img/gascomblimpio.pdf>
- ✓ <http://mirror.perupetro.com.pe/downloads/contratogas.pdf>

VI. Apéndice

Información Básica para la Evaluación Económica

A) Tabla Conversión de Volumen

	m³	ft³	litro	US gal
1 metro cúbico (m³)	1	35.33	1000	264.17
1 pie cúbico (ft³)	0.0283	1	28.3	7.4805
1 litro	0.001	0.0353	1	0.2642
1 Galón americano (US gal)	3.785x10 ⁻³	0.1336	3.785	1

Nota: 1 barril = 42 galones

B) Tabla de Conversión de Energía

Gas Natural	BTU	Kcal	Kilowatt-hora
1 pie cúbico (ft³)	1000	252	0.29
1 metro cúbico (m³)	35314	8899.12	10.27

C) Tabla Conversión de Presión

	Bar	Atm	Kgf/cm²	lbf/in² (psi)
1 bar	1	0.987	1.02	14.5
1 atmósfera (atm)	1.013	1	1.03	14.7
1 Kgf/cm²	0.981	0.968	1	14.2
1 lbf/in² (psi)	0.069	0.068	0.07	1

D) Tabla comparativa de los combustibles por contenido energético

	Gas Natural	GLP (1)	Kerosene (1)	Diesel (1)	Residual 6 (1)	Residual 500 (1)	Carbón (2)
1 MM BTU	1000 ft ³	10.43 gal	7.87 gal	7.63 gal	6.98 gal	6.97 gal	34.4 Kg

MMBTU = Millón de BTU

(1)Fuente Petroperú

(2)Carbón Importado

VII. Lista de Tablas y Figuras

Tablas	Pág.
Tabla_1 Análisis Típicos de Algunos Combustibles de Uso Industrial	12
Tabla_2 Composición en Volumen Típica del Gas Natural Comercial	15
Tabla_3 Especificaciones de calidad del gas para Perú	16
Tabla_4 Abreviaturas	16
Tabla_5 Componentes del Gas Natural	24
Tabla_6 Análisis Comparativo de Combustibles Industriales	46
Tabla_7 Emisión de Contaminantes de Combustibles	49
Tabla_8 Resumen de Efectos de Distintos Contaminantes Sobre la Salud de las Personas y en el Ambiente	54
Tabla_9 Especificaciones de consumo y producción de calderas piro tubulares	55
Tabla_10 Mantenimiento preventivo de una caldera. Residual Vs. Gas Natural	58
Tabla_11 Cuadro Comparativo Residual 6 vs Gas Natural	60
Tabla_12 Precios de los Combustibles en el Perú	61
Figuras	Pág.
Figura_1 Esquema de Combustión Perfecta	18
Figura_2 Esquema de Combustión Completa con Exceso de Aire	19
Figura_3 Combustión Incompleta con Defecto de Aire	20
Figura_4 Combustión Imperfecta	21
Figura_5 Generación de Energía Eléctrica con Ciclo Simple	31
Figura_6 Generación de Energía Eléctrica con Ciclo Combinado	32
Figura_7 Cogeneración Simple con Turbina de Gas	32
Figura_8 Cogeneración Aprovechando Gases de Combustión del Horno	33
Figura_9 Esquema Petroquímico	34
Figura_10 Emisiones de CO ₂	50
Figura_11 Emisiones de SO ₂	52
Figura_12 Emisiones de Metano	53
Figura_13 Precios de los Combustibles en el Perú	62