

ESCUELA SUPERIOR  
POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA



\*D-6847\*

"USO DEL GAS NATURAL DEL GOLFO DE GUAYAQUIL COMO  
COMBUSTIBLE EN LA CENTRAL TERMO-ELECTRICA  
ESTERO SALADO"

06/03/83

TESIS DE GRADO  
PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO

PRESENTADA POR:

LUIS TINOCO ROMERO

GUAYAQUIL-ECUADOR  
1.982

## AGRADECIMIENTO

AL ING. MARCO PAZMIÑO B.  
Director de Tesis, por su  
valiosa colaboración pres-  
tada en la realización de  
este trabajo.

Al Ing. Gonzalo Zevallos  
A los Ingenieros Hugo Huerta,  
Xavier Hidalgo, Efrén Romero,  
Perfecto Cnacón y Jacinto Hen-  
ríquez.

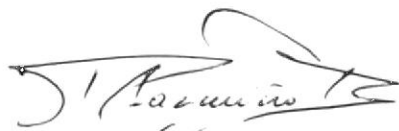
Al Dr. Alfredo Barriga

Al Ing. Rafael Drouet

Al Ing. Raúl Lascano

## DEDICATORIA

A mi PADRE y a mi MADRE, que siempre han sabido asistirme para avanzar en la vida, tanto espiritual como intelectual, con su paciencia, - con sus consejos, consolándome en mis momentos tristes y alegrándose en mis triunfos. Gracias inmensas ya que sin ellos no habría culminado la profesión de Ingeniería Mecánica.



ING. MARCO A. PAZMIÑO B.

Director de Tesis

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).



LUIS TINOCO ROMERO

## RESUMEN

El proyecto está fundamentado en la COMBUSTION, ésto es, del Gas Natural, que se lo presenta como combustible alternante con el Bunker C.

De acuerdo a la estructura del temario, se establecen razones, ventajas y desventajas en usar el Gas Natural como combustible, luego se analizan las composiciones químicas y se obtienen los fundamentos teóricos necesarios de combustión para la labor posterior.

Prosiguiendo el orden estructural se hace una revisión de los equipos que constituyen el sistema de Combustión, además el proceso de combustión y sus productos usando Bunker C, también se indican normas generales de operación.

Luego, se analiza la utilización del Gas Natural como combustible fundamentado en los capítulos anteriores, en datos proporcionados por CEPE (Corporación Estatal Petrolera Ecuatoriana) y la Bibliografía que se dispone que servirá para el diseño de diferentes partes del sistema de Combustión del nuevo combustible, además se revisan los instrumentos de regulación y control que conformarían este sistema.

Finalmente mediante balances de materia y energía se establecen ahorros de vapor que se obtienen al usar Gas Natural, también las eficiencias con ambos combustibles, - para en el siguiente capítulo hacer un análisis técnico, económico y de factibilidad basado en los resultados obtenidos en los capítulos anteriores.

# INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE FIGURAS	XIV
INDICE DE TABLAS	XVIII
INTRODUCCION	XXII
CAPITULO I	
GENERALIDADES	23
1.1. Conveniencias del Proyecto	23
1.2. Motivos que impulsaron el presente proyecto.	25
1.3. Ventajas y desventajas del uso del Gas Natural como combustible.	26
CAPITULO II	
FUNDAMENTOS TEORICOS	31
2.1. Generalidades sobre los combustibles actuales.	31
2.1.1. Bunker C	33
2.1.2. Diesel	38
2.2. Fundamentos del combustible alterno: Gas Natural.	40
2.2.1. Aspectos físicos del Gas Natural.	43
2.2.2. Límites de inflamabilidad Aire primario.	48
2.2.3. Efecto del peso específico, poder calorífico, velocidad de llama, límites de inflamabilidad.	56

	Pág.
2.2.4. Efecto del arrastre de aire primario a causa de cambios de peso específico.	57
2.2.5. Velocidad de llama, límites de inflamabilidad.	58
2.3. Teoría Básica sobre combustión: Bunker C, Diesel y Gas Natural.	64
2.3.1. Definiciones y clasificaciones de los principales fenómenos relacionados con la combustión.	64
2.3.2. Condiciones límite para que se produzca llama a) Límites de inflamabilidad; b) Límites de temperatura; c) Límites de presión; d) Efecto pared.	68
2.3.3. Aspectos químicos de la combustión	70
2.3.4. Combustión de productos líquidos.	72
2.3.5. Combustión de mezclas gaseosas.	78
2.3.6. Breve resumen de la estequiometría de la combustión.	80
2.3.7. Cálculos con el Bunker C.	87
2.3.8. Cálculos con Gas Natural.	102
2.3.9. Resumen comparativo de los cálculos teóricos.	117

	Pág.
2.3.10. Aspectos físicos de combustión. Efecto de la turbulencia sobre la llama y sobre los fenómenos de ignición y extinción. Comportamiento de las llamas premezcladas.	119
2.4. Cálculo de Generación de Calor	127
CAPITULO III	
SISTEMA ACTUAL DE COMBUSTION	
3.1. Descripción del equipo: Caldera y equipos adicionales.	130
3.1.1. Hogar: Banco de tubos, Domos, refractarios. Características del Hogar. Banco de tubos y refractarios. Circulación de agua. Vapor en la caldera. Supercalentador. Atemperador del supercalentador. Domo. Características de diseño.	132
3.1.2. Sistema de Quemadores	156
3.1.3. Sistema de registros de aire	162
3.1.4. Sistema de Sopladores de Hollín.	165
3.1.5. Calentador de aire regenerativo. Operación de lavado. Características de diseño.	171
3.1.6. Calentador de aire a vapor. Principales características de diseño.	178

	Pág.
3.1.7. Ventilador de tiro forzado. Características de diseño.	182
3.2. Proceso de combustión. Sistema de Combustible: Bunker C. Sistema de aire para la combustión. Circuito de vapor, aire de atomización y de purga de quemadores. Sistema de ignición para iniciar el encendido de caldera. Notas sobre operación del equipo de combustión.	189
3.2.1. Productos de combustión: Cenizas, Hollin, influencia del exceso de aire en la formación del anhídrido sulfúrico.	224
3.2.1.A. Cálculo real de los productos de combustión (Bunker C).	228
3.2.2. Evacuación de los productos de combustión.	231
3.3. Mantenimiento y limpieza del equipo	236
3.3.1. Caldera: Purgas y golpe de llama. Mantenimiento del hogar. Formación de depósitos en los tubos de agua.	236
3.3.2. Mantenimiento y limpieza de los supercalentadores.	241
3.3.3. Mantenimiento y limpieza de los quemadores.	244
CAPITULO IV	
USO DEL GAS NATURAL COMO COMBUSTIBLE	246

	Pág.
4.1. Transporte y almacenamiento de Gas Natural	246
4.2. Rediseño del sistema de combustión	252
4.2.1. Sistema de combustible: Gas Natural.	252
4.2.2. Sistema de quemadores	254
4.2.3. Sistema de Registros de Aire	271
4.2.4. Proceso de combustión	273
4.3. Regulación y control de combustión	279
4.3.1. Sistema de control de la razón Gas Natural/aire	280
4.3.2. Diagrama de flujo para el sistema de combustión, usando gas natural como combustible: parámetros.	284
4.3.3. Control de la presión de la razón Gas Natural/aire: reguladores de presión.	292
4.3.4. Control de flujo de la razón Gas Natural/Aire.	300
4.3.5. Controles de Seguridad	302
4.3.5.1. Válvulas automáticas de corte de combustible.	304
4.3.5.2. Sistema de válvulas supervisoras.	311
4.3.6. Sistema de Control de Quemadores.	315
4.4. Mantenimiento y Limpieza del equipo	319
CAPITULO V	
CALCULOS COMPARATIVOS	325

	Pág.
5.1. Datos	325
5.2. Balance de materia y Energía	332
5.3. Eficiencias	343
5.3.1. Deducción de la ecuación	344
5.3.2. Bunker C	347
5.3.3. Gas Natural	350
CAPITULO VI	
DISCUSION DE RESULTADOS	353
6.1. Análisis técnico comparativo de los dos sistemas.	353
6.2. Análisis económico comparativo de los dos sistemas.	361
6.3. Factibilidad de instalación del sistema alternativo.	379
SINTESIS DEL ESTUDIO	388
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	391
APENDICE: A. PLANOS Y GRAFICOS	398
B. TABLAS	455
BIBLIOGRAFIA	417

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA N <sup>o</sup>	DESCRIPCION	Pág.
2.1.	Límites de inflamabilidad de gases y vapores.	50
2.2.	a) Corte de quemador Bunsen b) Quemador de gas atmosférico	53 53
2.3.	Exceso de aire en función del % de $O_2$ en gases quemados.	55
2.4.	Porcentaje teórico de aire para la combustión.	55
2.5.	Tendencia al retorno de llama.	60
2.6.	Curva del equilibrio $SO_2 + O \rightleftharpoons SO_3$ .	101
2.7.	Perfil de temperatura en un frente de llama	121
2.8.	Esquema del funcionamiento de un quemador cilíndrico (Tipo Bunsen).	125
3.1.	Ensamblaje de las paredes del hogar	135
3.2.	Diagrama de circulación de agua-vapor.	139

FIGURA N <sup>o</sup>	DESCRIPCION	Pág.
3.3.	Tubería sobrecalentador primario	143
3.4.	Tubería sobrecalentador secundario.	143
3.5.	Interior del domo de vapor.	150
3.6.	Plan básico de la Caldera.	151
3.7.	Diagrama de Flujo de vapor y agua.	152
3.8.	Disposición lateral de la instalación del quemador.	157
3.9.	Vista frontal del quemador Bunker C.	160
3.10.	Esquema del quemador Bunker C.	161
3.11.	Sopladores de hollín: tipo retráctil y rotativo.	166
3.12.	Calentador de Aire Regenerativo (CAR).	172
3.13.	Elementos de Calentamiento del CAR	175
3.14.	Sistema de lavado de Agua del CAR	175

FIGURA N <sup>o</sup>	DESCRIPCION	Pág.
3.15.	Elementos del Calentador de Aire a Vapor.	179
3.16.	Parte exterior del Calentador de Aire a Vapor.	180
3.17.	Ensamblaje de la Vena de Control del Ventilador de Tiro Forzado.	187
3.18.	Formas típicas de llama.	190
3.19.	Diagrama del sistema de Combustible: Bunker C.	201
3.20.	Diagrama del Sistema de Vapor de atomización.	208
4.1.	Mezclador de Gas a chorro.	265
4.2.	Quemador con mezclador de tobera.	284
4.3.	Diagrama del Sistema de Combustible: Gas Natural.	287
4.4.	Regulador de la razón gas/aire.	294
4.5.	Tubería para un regulador de presión de la razón gas natural/aire	296

FIGURA N <sup>o</sup>	DESCRIPCION	Pág.
4.6.	Regulador de reducción - presión de gas natural.	298
4.7.	Diagrama directo operado por un control de la razón combustible/aire del tipo de control de flujo.	301
4.8.	Operación de una válvula manual de corte de combustible.	306
4.9.	Disposición para una válvula automática de corte de combustible.	309
4.10.	Esquema de la tubería de gas con un sistema supervisor de válvulas con quemadores pilotos.	314
5.1.	Calor del vapor Vs. Pérdida de Calor.	336

## INDICE DE TABLAS

TABLA N <sup>o</sup>	DESCRIPCION	Pág.
2.1.	Características principales del Bunker C. Dpto. Petróleo, Energía y Contaminación. Universidad Central - Quito.	34
2.2.	Características principales del Bunker C. Laboratorio CAUTIVO - CEPE.	35
2.3.	Análisis Químico Bunker C	38
2.4.	Composición Gravimétrica del <u>Die</u> sel.	39
2.5.	Características técnicas del Diesel - CEPE.	40
2.6.	Poder calorífico de los componen <u>tes</u> en los límites de inflamabilidad superiores.	49
2.7.	Poder calorífico y aire neces <u>a</u> rio para la combustión completa.	51
2.8.	Límites superiores de inflamabilidad de varias mezclas de gases de petróleo.	61

TABLA N <sup>o</sup>	DESCRIPCION	Pág.
2.9.	Análisis del Gas Natural. Pozo Amistad N <sup>o</sup> 1.	62
2.10.	Determinación del Peso molecular, gravedad específica, presión crítica, temperatura crítica del Gas Natural (Pozo Amistad N <sup>o</sup> 1).	63
2.11.	Composición gravimétrica del Bunker C y Gas Natural.	117
2.12.	Cálculos teóricos de combustión.	118
2.13.	Valores de combustible para diferentes generaciones de calor.	128
3.1.	Generación Real: Bunker C.	194
3.2.	Producción, rendimiento y consumo (informe típico mensual).	196
3.3.	Productos reales de combustión del Bunker C.	230
4.1.	Características de diseño del quemador para Gas Natural.	260
4.2.	Características de diseño del rango de trabajo del quemador.	267

TABLA N <sup>o</sup>	DESCRIPCION	Pág.
4.3.	Características y propiedades del Gas Natural y de la mezcla.	268
4.4.	Características del quemador.	269
4.5.	Generación Real & Gas Natural.	278
4.6.	Características de trabajo para el flujo de Gas Natural para sobrecarga de Generación.	289
4.7.	Productos reales de combustión con gas natural.	323
5.1.	Registro de operación - Panel superior de arranque de caldera.	325
5.2.	Dimensiones.	330
5.3.	Datos de producción, distribución y consumo de vapor en operación normal a varias cargas.	331
5.4.	Resultados del Balance de materia y energía.	342
5.5B.	Eficiencias de la Caldera usando Bunker C a diferentes generaciones (MW).	349

TABLA N <sup>o</sup>	DESCRIPCION	Pág.
5.5GN.	Eficiencias de la Caldera usando Gas Natural a diferentes generaciones (MW).	352
6.1.	Cuadro comparativo de costos de combustible.	370

## INTRODUCCION

Este proyecto tiene por objeto establecer las convenien  
cias de instalación de un nuevo sistema de combustible  
usando el Gas Natural del Golfo de Guayaquil, aplicable  
a la Central Térmica Estero Salado, ubicada en las inme  
diaciones del Salitral.

El Gas Natural de las características que se tiene en  
nuestra plataforma de mar, presenta muchas ventajas al  
implantar su uso en una planta industrial, razones su-  
ficientes que han conducido a investigar en el tema.

Sin ser un estudio profundo de todos los factores que  
inciden en la instalación de este nuevo sistema de com-  
bustible, se pretende dar una idea más concreta de los  
alcances que acarrearían tal cometido, tanto desde el  
punto de vista técnico como económico.

# C A P I T U L O I

## GENERALIDADES

### 1.1. CONVENIENCIAS DEL PROYECTO

Indudablemente que en la actualidad el tema del "mejor aprovechamiento de la energía" constituye el más importante y palpitante, si tenemos en cuenta, por ejemplo, la crisis del petróleo o crisis energética de 1973, lo cual derivó en el agravamiento de las economías de todas las naciones, en especial, de las del tercer mundo o naciones subdesarrolladas (como en nuestro país); la espiral inflacionaria ha alcanzado valores no-imaginables; de ahí que, el estudio de nuevas formas de energía más rentables y más baratas al usuario pasó a ser el tema de actualidad, en el que las naciones más desarrolladas llevan siempre los primeros sitiales en la investigación.

Se han obtenido muchos logros, valiosos por cierto; así vemos en el campo de la energía solar, se han construído; secadores de granos, calentadores de agua, calentadores de piscinas, aparatos de acondicionamiento de -- aire, etc. En el campo de la energía eólica, de la energía del bio-gas, se ha avanzado bastante, pero también es verdad que falta aún mucho por recorrer.

El presente tema constituye un nuevo concepto del aprovechamiento de energía en nuestro país, particularmente en la Central Estero Salado con el Gas Natural del Golfo de Guayaquil.

Impulsados por esa idea, se trata en este tema de establecer las ventajas y desventajas, factibilidad de instalación, desde un punto de vista económico y técnico. Para lo cual primeramente se hace una revisión de conceptos teóricos, de la naturaleza de los combustibles usados y del propuesto a usarse, de las condiciones que tienen durante el proceso de combustión y la generación de calor con la consecuente producción de vapor.

El Gas Natural será usado como un combustible alternativo, dejando la posibilidad de usar el Bunker C en el momento apropiado de acuerdo a las necesidades.

Se hace una revisión del equipo que se usa, describiendo el proceso de combustión, los productos de ella y el mantenimiento del equipo. El mismo procedimiento se lo repite pero usando Gas Natural, para entonces pasar a hacer balances de materia y energía y obtener eficiencias, todo lo cual ayuda luego a realizar el análisis técnico comparativo de los dos sistemas.

Revisando costos de equipos, consumo de combustible, se hace el análisis económico comparativo de los dos sistemas para finalmente establecer la factibilidad de instalación del nuevo sistema y las conclusiones finales.

## 1.2. MOTIVOS QUE IMPULSARON EL PRESENTE PROYECTO

Entre los motivos principales que promueven este proyecto, está el abaratamiento de costos en el consumo de combustible lo cual traería por consecuencia una producción de energía eléctrica más barata en beneficio de todo el país. El usuario tanto a nivel doméstico como a nivel industrial se verían beneficiados, además, sería un incentivo para la instalación de nuevas industrias, todo lo cual viene a revitalizar la economía del país, subiendo el nivel de vida de los ecuatorianos.

Además el uso de un nuevo combustible diferente del petróleo, en la producción de energía eléctrica, da oportunidad a que el petróleo de exportación se venda en mayor cantidad, lo cual también significa un aumento de las divisas al país.

También, el uso de Gas Natural, promueve a aumentar los conocimientos en el manejo, transmisión, producción y más que todo en el uso que se le pueda dar, tratando de usarlo en la aplicación más rentable y de más beneficio

a los intereses del país; así se observa que su campo de aplicación es muy amplio: en la producción de vapor, como materia prima en la industria química (síntesis del amoníaco, síntesis del alcohol metílico o metanol, síntesis del acetileno, preparación de hidrógeno puro, etc.) aplicación del gas en la industria del vidrio, en la industria del cemento, en la industria de la construcción, en la industria alimenticia, etc.

### 1.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DEL GAS NATURAL

El uso del Gas Natural en cualesquiera de sus aplicaciones es muy importante, ya que en nuestro país constituye una innovación de las fuentes de energía e industriales. Pero particularizando, su uso, a la producción de vapor, es decir, al uso del Gas Natural como combustible, se va a analizar las ventajas y desventajas que presenta; como ventajas se tiene:

- El empleo de un combustible noble, tal como el gas natural, conduce a una mejora en la utilización de la Central. En efecto, mas programas de base más interesantes (incluso en las horas de menor consumo) reducen el número de paradas en los bloques de producción. Por una parte, esta circunstancia es muy favorable para el buen mantenimiento de los materiales térmicos, tendiendo por otra parte a aumentar sensiblemente la produc-

ción eléctrica de la central.

- El Gas Natural es un combustible mucho más flexible que el Bunker C., y por lo tanto, se presta más fácilmente al control automático a distancia.
- El Gas Natural se adapta muy bien a la combustión mixta con el Bunker C. El hecho de que una central esté equipada por quemadores mixtos a dos combustibles, permite múltiples operaciones que son muy interesantes en ciertos casos y deben permitir, por otra parte, limitar un poco la indisponibilidad de las calderas.
- Finalmente, empleando Gas Natural, los recalentadores de aire tanto regenerativo como a vapor del Caldero están al abrigo de las correcciones sulfúricas (problema principal en las calderas que consumen aceites pesados: Bunker C).
- A su vez el arranque desde el estado frío se lo podría hacer con Gas Natural en condiciones económicas muchísimo más ventajosas que con el Diesel.
- De lo anotado se deduce que el equipo de combustión para el Gas Natural es más simplificado de ahí que la operación se vea facilitada.

Cabe señalar también que la utilización del Gas Natural, en una Central Térmica, presenta algunos inconvenientes, a saber:

- Consigna severas de seguridad para el personal, para el material.

El gas es un combustible más manejable, flexible que el Bunker C, por tanto, presenta mayores peligros y riesgos de explosión.

El gas se presta fácilmente a los controles automáticos a distancia. Esta facilidad de maniobra precisa una atención y vigilancia exigente, al transmitirse las reacciones del material con retraso y sin la precisión de un examen directo.

Se debe recordar que los dispositivos automáticos de seguridad tiene por objeto:

- .- Obligar a efectuar ciertas maniobras en un orden de terminado;
- .- Evitar ciertos errores de maniobra;
- .- Automatizar la marcha de ciertos factores representativos del funcionamiento.

No todo puede controlarse automáticamente y tampoco

pueden excluirse las posibles fallas del material eléctrico, electrónico y automático. En consecuencia, los dispositivos de seguridad automáticos no autorizan a ningún abandono de la vigilancia y el manejo del equipo.

Las zonas prohibidas a los fumadores y a los obreros que emplean aparatos con llama sin protección o generadores de chispas, deben ser escrupulosamente respetados. Los puestos de defensa contra incendios deben estar en número suficiente, en perfecto estado y controlados con regularidad. Las consignas en caso de incendio deben ser perfectamente conocidas por todo el personal.

El encendido de la Caldera estará precedido por una ventilación mínima del hogar de por lo menos 3 minutos.

Debe asegurarse que la ventilación sea efectiva, comprobando que gira el ventilador de tiro forzado y las venas de entrada y soplado de aire suficientemente abiertas. Es preciso asegurarse, por otra parte, que durante la ventilación todas las entradas de gas al hogar están cerradas. Esto precisa una visita de la instalación para comprobar la posición de las válvulas manuales y el examen de la señalización para las válvulas gobernadas a distancia.

- Rigidez de los circuitos de secuencia de combustible y seguridad (que supone, especialmente durante el período de puesta en marcha, frecuentes saltos en el contacto de los bloques de producción).

## CAPITULO II

### FUNDAMENTOS TEORICOS

#### 2.1. GENERALIDADES SOBRE LOS COMBUSTIBLES ACTUALES

Los residuos (fuel-oil, diesel) de la destilación y el "cracking" del petróleo son cada vez más viscosos e impuros. Sin embargo, el uso de estos aceites residuales ha tomado un incremento extraordinario, y aunque su precio es cada día más alto, motivado por la crisis mundial del petróleo y el carbón y las cada día crecientes necesidades térmicas de la industria o del confort, su calidad va decreciendo continuamente. Si a estas circunstancias se añade que, por imposiciones tecnológicas o para suprimir la cada día mas escasa y onerosa mano de obra, se han de automatizar los sistemas de combustión, resulta entonces que la mala calidad del fuel-oil, exige métodos especiales para su empleo como combustible noble.

Parece ser que las sedimentaciones, la obturación de filtros y las obstrucciones de conductos se deben principalmente a parafinas y asfaltenos, las primeras se suprimen por fusión al calentar el combustible, mientras que los segundos quedan insolubles y floculan aún a temperaturas elevadas, superiores a 100°C, provocando polimerizacio-

nes; el calor acelera la madurez de los asfaltenos. De todo ésto se deduce que el precalentamiento excesivo da lugar a la formación de residuos insolubles y de resinas duras y compactas, altamente abrasivas para engranajes y "chiclers" antes de la combustión, y origen de la carbonilla típica que con frecuencia se observa en los humos.

El contenido en azufre de los aceites de combustión tiene una gran importancia porque los productos de su combustión son un peligro notable en el aspecto higiénico, dado que aún a pequeñas concentraciones provoca accidentes graves en la vida animal y vegetal. En el aspecto económico, ornamental y técnico, los ácidos sulfurosos y sulfúrico procedentes de la combustión del azufre de los combustibles, revisten singular importancia, en especial los óxidos de azufre contenidos en los humos de combustión del hidrocarburo, que por contener también agua procedente de la combustión del hidrógeno y poder alcanzarse el punto de rocío fácilmente, aún en los propios hogares de combustión o en los conductos de humos metálicos, se convierten en los correspondientes ácidos con ataque y destrucción de aquéllas.

Los combustibles consumidos en la Central Estero Salado provienen de los yacimientos petrolíferos ecuatorianos, y se denominan: Bunker C y Diesel, se los transporta por

vía marítima y fluvial al muelle que existe en el Estero Salado, el cual se encuentra situado a 800 metros del tanque de Almacenamiento de la Central. Buques tanques descargan continuamente el Bunker C más a menudo que el Diesel, el que también se suministra por medio de carros - tanques. El Bunker C es el combustible que se utiliza en forma diaria en la producción de vapor, mientras que el Diesel se utiliza solamente en los arranques de caldera, para la puesta en marcha desde el estado frío y otros usos menores, como son entrada y salida de servicio de quemadores. Por esta razón, en los posteriores cálculos y análisis tales como rendimientos, eficiencias de caldera, se los realizará preferentemente con Bunker y con el combustible alternativo: Gas Natural, dejando el Diesel en un segundo plano, debido a su uso limitado.

#### 2.1.1. Bunker C

El Bunker C (fuel-oil) es un residuo de la destilación y el "cracking" del petróleo, es suministrado a la Central Estero Salado por vía marítima y fluvial ya sea desde la ciudad de Esmeraldas o desde la Península de Sta. Elena. Para su transporte es necesario darle una temperatura adecuada, es decir, hay que calentarlo, ya que debido a su viscosidad es difícilmente maniobrable.

Dentro de lo difícil que resulta mantener unas características constantes en un residuo de la naturaleza del Bunker C, y en base a análisis hechos por laboratorios nacionales para la Central Estero Salado; se tiene:

TABLA 2.1

CARACTERISTICAS PRINCIPALES DEL BUNKER C. DPTO.  
DE PETROLEO, ENERGIA Y CONTAMINACION -  
UNIVERSIDAD CENTRAL-QUITO

Combustible:	Bunker 6	
Origen:	Península de Sta. Elena	
Densidad (a 15.6°C) Kg/m <sup>3</sup>		951.6
Densidad A.P.I.		17.2
Punto de inflamación, °C		138
Punto de fuego, °C		158
Viscosidad a 50°C, S.S.U.		731
a 80°C, S.S.U.		178
a 100: F,S.S.U.		1530
Agua, %		Trazas
Carbón conradson, %		10.44
Cenizas, %		0.15
Azufre, %		1.60
Hidrógeno, %		8.20
Indice viscosidad		187

Calor combustión neto o inferior (Kcal/Kg)	10611,70
(J/Kg)	44.420.576
Calor combustión bruto o superior (Kcal/Kg)	10.947
(J/Kg)	45.824.142
Vanadio, p.p.m.	Trazas
Sodio, p.p.m.	Trazas
Punto de anilina, °C	66
°F	150
Punto de vertido, °C	7

TABLA 2.2.

CARACTERISTICAS PRINCIPALES BUNKER CCEPE - LABORATORIO CAUTIVO

Origen: Esmeraldas  
 Combustible: Bunker  
 Año: 1980

	<u>Julio</u>	<u>Agosto</u>	<u>Septiembre</u>	<u>Octubre</u>
Gravedad específica	0.9503	0.9535	0.9522	0.9522
A.P.I.	17.4	16.9	17.1	17.1
Punto, Inflamación, °F	285	290	290	285
Agua por destilación,%V	0.2	0.1	0.1	0.2
Cenizas, % peso	0.03	0.04	0.05	0.034
Calor combustión(Btu/lb)rs	18929	18888	18890	18890
Azufre, % Peso	1.42	1.41	1.41	1.49
Vanadio (ppm)	112	125	127	117
Viscosidad Saybolt a 100°F sgdo.	3805	3714	3821	3805

Del muelle existen dos líneas a la Central, una de diámetro de 10 pulgadas, la que descarga en el tanque de Almacenamiento de petróleo, la otra de diámetro de 8 pulgadas al de almacenamiento de Diesel.

La unidad comercial para la medición del petróleo, en el mercado internacional, es el barril, con excepción de los países de habla inglesa, en los demás se utiliza el sistema métrico M.K.S. El combustible líquido se mide en litros, a una temperatura de 4°C ó en Kg para pruebas y cálculos, el gaseoso en metros cúbicos.

Siendo la materia prima, el combustible, para la producción de energía en la Central, es indispensable conocer con precisión la cantidad que es recibida en los tanques, y el consumido en la caldera a diferentes cargas, así como los consumos - específicos en Kg. de combustible/KWH ó en Kcal/KWH.

Si no existe una evaluación exacta del combustible utilizado por la Caldera, no puede conocerse el comportamiento de las unidades generadoras, con márgenes aceptables.

El consumo de combustible por caldera (según pruebas de aceptación) son:

<u>GENERACION</u>	<u>73 MWH/H</u>	<u>53 MWH/H</u>
Consumo combustible (lt-hr)	18.863-17490	14085-13060

El consumo diario es:

13.060 Kgs. x 24	313.440 Kg.
14.085 x 24	338.040 lts.

para una generación media de 53 MWH/H.

El precio actual del combustible de la calidad del consumidor en la Central Estero Salado, tiene un precio elevado en el mercado mundial, lo que quiere decir que debido a que la Central es una entidad de servicio público, obtiene el combustible a un precio especial.

La eficiencia de las unidades deben conservarse, aún cuando se deba reducir el KWH generado, con lo cual se reduce también el consumo de combustible.

Para efectos de cálculos de combustión del Bunker C, se han hecho análisis químicos, así:

TABLA 2.3

ANALISIS QUIMICO

C =	0.8666	( carbono)
H <sub>2</sub> =	0.1157	(hidrógeno)
O <sub>2</sub> =	0.0043	(oxígeno)
N <sub>2</sub> =	no llega	(nitrógeno)
S =	0.0121	(azufre)

En la tabla B.1 se puede apreciar propiedades físicas y constantes de combustión para cada elemento.

## 2.1.2. Diesel

El combustible Diesel oil es obtenido desde el aceite crudo (petróleo) y el ciclo se origina desde la descomposición catalítica (cracking). La investigación está dirigida hacia el desarrollo de aditivos para el diesel oil, para proveer características de ignición sin empeorar otras propiedades.

El diesel es usado en la CES en forma limitada: para arrancar la unidad desde el estado frío (levantar presión); para usarlo en los quemadores piloto de la caldera (que facilitan el encendido de

los quemadores Bunker, es necesario tener encendido el quemador Diesel.

El equipo Diesel de la CES consta de bomba Diesel, válvula de control de presión, válvulas de corte, quemadores y encendedores.

Para el sistema Diesel, hay 2 líneas: la una sirve para el arranque (va a los quemadores), y la otra para los encendedores Diesel. El flujo del Diesel de arranque es controlado en la salida de la bomba Diesel por operación manual desde el cuarto de control.

El cañón de los quemadores Diesel (los 3 inferiores) sirve también en el caso del Bunker, solamente se hace en la pastilla de atomización ubicada en el extremo del cañón, ya que cuando se trate de uno u otro tipo de combustible.

El análisis químico del Diesel es el siguiente:

TABLA 2.4

COMPOSICION GRAVIMETRICA

C:	85.5 %
N <sub>2</sub> :	---
O <sub>2</sub> :	1.51 %
H <sub>2</sub> :	12.5 %
Cenizas:	-----
S :	0.49 %

TABLA 2.5

C E P ECARACTERISTICAS TECNICAS DEL DIESEL

Gravedad específica a 15.6°C	0.865
Viscosidad, Cst, a 15.6°C	7.5
Azufre, % en peso	0.80
ECUADORIAN OILFIELDS, LIMITED, LABORAT. LA LIBERTAD	
Grav. Específ. a 60°F	0.8546
punto inflamación °F	180
Punto congelación °F	30
Visc. Sayb. Univers. a 100°F, seg.	46
Visc. absol. centipoises	6.5
Agua y sedimento % Vol.	Nada
Cenizas, % peso	-
Azufre, % peso	0.49
Vanadio, ppm	1.5
Punto inicial ebullición °C	195
Punto final ebullición °C	395

## 2.2. FUNDAMENTOS DEL COMBUSTIBLE ALTERNO: GAS NATURAL

El gas natural es uno de los principales combustibles gaseosos para la obtención de energía. En su estado natural, inodoro e incoloro, arde con llama ligeramente luminosa y es altamente explosivo cuando se mezcla con

el aire. La íntima asociación del petróleo y del gas hace difícil considerar a cada uno de ellos por separado, ya que dos yacimientos de gas de petróleo se superponen en grandes extensiones. El gas natural se acumula en las partes superiores de los yacimientos y su origen es el mismo que el del petróleo. Se encuentra en rocas pertenecientes a los períodos terciario y carbonífero.

El gas natural tiene una composición muy variable: en algunos casos está constituido casi exclusivamente por metano, y en otros, por una mezcla de metano y de hidrocarburos más pesados (etano y homólogos de la serie parafínica) junto con anhídrido carbónico, nitrógeno, helio.

Debido a la uniformidad de su composición, facilidades de control y de medida, y simplicidad de los dispositivos de combustión, el gas natural puede considerarse como el combustible ideal para un gran número de aplicaciones.

*Gas Natural  
comb.*

La combustión de las mezclas gaseosas es evidentemente más sencilla que la de combustibles líquidos y sólidos, puesto que la unión con el comburente; operación que determina la calidad de la combustión, es

mucho más fácil de lograr; la sustitución de una mezcla por otra en un quemador determinado implica problemas de intercambio de los productos relacionados con las características del quemador y con la cantidad de aire necesario para la combustión, la velocidad de la combustión de los respectivos gases y la cantidad de gas distribuido (además del poder calorífico y la densidad).

Para lograr una combustión completa, es necesario ante todo mezclar el combustible con una cantidad suficiente de aire, o mejor de oxígeno. Como es prácticamente imposible efectuar una mezcla de los dos reactivos, hay que suministrar generalmente una cantidad de aire superior a la prevista en teoría, es decir, trabajar con exceso de aire.

Como es obvio, cuanto más elevado es el grado de mezcla obtenido, menor es la cantidad de aire que se necesita para completar la combustión: por esta razón, los combustibles gaseosos, a causa de su naturaleza, que facilita la mezcla, necesitan menor exceso de aire que los combustibles líquidos y sólidos. Un exceso de aire demasiado fuerte produce efectos negativos, ya que hace bajar la temperatura de combustión y consiguentemente reduce el rendimiento de los aparatos.

### 2.2.1. Aspectos físicos del Gas (natural)

Gas en el sentido físico, es uno de los tres estados de la materia, y de manera similar al estado líquido carece de una forma determinada. Diferenciándose de los líquidos, sus partículas moleculares componentes han sido excitadas mediante la adición de energía hasta el extremo que colisionan unas con otras, y con las paredes del recipiente que las contiene; las moléculas del gas colisionan de forma totalmente elástica, es decir sin pérdida de energía. De esta manera, las moléculas de gas permanecerían constantemente en movimiento, lo que nos lleva de la mano al descubrimiento de una de sus primeras propiedades: la presión, expresada en kilos por centímetro cuadrado.

Un fenómeno no tan evidente fue observado por Avogadro, que cuidadosamente investigaba combinando pesos de distintos compuestos gaseosos. Después de numerosas investigaciones llegó a la conclusión de que "volúmenes iguales de gas a la misma presión y temperatura contenían el mismo número de moléculas". De esta forma 44 Kg. de propano ( $C_3H_8$ ) tendrán el mismo número de mo-

lécúlas que 28.8 Kg. de aire, cuando las condiciones son las mismas. Esto nos indica que la velocidad de las moléculas más ligeras deben ser mayor que el de las moléculas más pesadas. De esta forma podemos deducir que será más fácil para un gas ligero fluir a través de una tubería que un gas pesado.

Hacia 1829, Graham descubrió que los índices de difusión de distintos gases eran inversamente proporcionales a la raíz cuadrada de su densidad o peso molecular. La teoría cinética de los gases, propuesta por Bernoulli en 1738, muestra que por una consideración sobre el índice de cambio del momento, masa x velocidad (cuando una molécula colisiona en una superficie, y la distancia que debe recorrer en el recipiente), la velocidad es inversamente proporcional a la densidad del gas. Por esto la velocidad relativa de los gases de distinto peso molecular que viajan a través de una tubería de  $1/\sqrt{d}$ .

Resulta sencillo, a partir de la ley de Avogadro, determinar la densidad relativa de los gases tomando la relación de sus pesos moleculares. Si el gas se compara con el aire se llama entonces

peso específico. De esta forma el propano con un peso molecular  $M$  de 44 tiene un peso específico  $PE$  de  $44/28.8 = 1.52$  teóricamente. La velocidad de los gases varía proporcionalmente a  $\sqrt{PE}$ .

Nuestro objetivo es la consideración de los combustibles gaseosos, por lo que nuestra única razón para emplear el gas es la energía calorífica que libera cuando se quema con aire. La unidad de calor empleada es la caloría (cal). Se define como el calor necesario para elevar la cantidad de un gramo de agua (a la temperatura de  $4^{\circ}C$ )  $1^{\circ}C$ . En la práctica la unidad de volumen más corriente es el metro cúbico, por ello la unidad de calor de poder calorífico de un gas es la kilocaloría por metro cúbico ( $Kcal/m^3$ ) de gas a  $0^{\circ}C$  de temperatura y 760 mm. de presión de columna de mercurio.

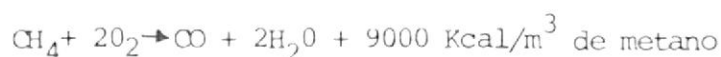
La capacidad de transporte de calor de un determinado gas, a través de una tubería, puede evaluarse en forma de una sencilla relación del poder calorífico superior, PCS, dividido por  $\sqrt{PE}$  permaneciendo el resto de condiciones invariables tales como: diámetro de la tubería, dife

rencia de presión, condiciones de la pared interna, temperatura, etc. El valor  $PCS/\sqrt{PE}$  para un combustible gaseoso, es una unidad básica muy importante que debe ser tan familiar como la temperatura, peso y presión.

El poder calorífico total debe determinarse solamente cuando los productos de la combustión estén de nuevo a la temperatura inicial del combustible y del aire, por lo que el calor latente de vaporización del agua debe añadirse al poder calorífico obtenido, si no ha sido posible condensar los productos de combustión. El poder calorífico neto es el que se obtiene sin la condensación. El poder calorífico superior PCS es el que se obtiene con la condensación del agua producida. Expresado en forma de una ecuación:

$$\text{Poder calorífico inferior} + \text{Calor latente de vaporización} = \text{Poder calorífico superior}$$

Como ejemplo tomemos la combustión del metano  $CH_4$ .



La ecuación, en forma que se describe, representa un kilo mol de metano. Esto es, representa su peso molecular en kilos. Para el metano, el carbono tiene un peso molecular  $M$  de 12 y el hidrógeno un  $M$  de 1, por tanto:  $12 + 4 = 16$ .

Por aplicación de la Ley de Avogadro podemos establecer que un kilo mo, o un mol-hilo si se quiere, de un gas ideal a  $15^{\circ}\text{C}$  y 760 mm. de presión de mercurio tendrá un volumen de  $22.4 \text{ m}^3$  y, por tanto, 16 Kg. de metano ocuparían  $22.4 \text{ m}^3$ . Así, si se producen dos moles de agua a 18 Kg. por  $(16 + 2)$ , se habrá producido un total de 36 Kg. de agua en la combustión de 16 Kg de metano.

El poder calorífico se expresa en kilocaloría - por metro cúbico, por tanto, los kilogramos de agua producidos por metro cúbico de metano son: (ver tabla 2.7).

$$\text{KgH}_2\text{O}/\text{m}^3 \text{ de metano} = 36 : 22.4 = 1,6 \text{ Kg.}$$

Como que el calor latente de evaporación del agua es de 583 Kcal/Kg, el calor liberado por la condensación de 1.6 Kg. es 885 kilocalorías y, por tanto, el poder calorífico inferior del metano será:

$$\begin{aligned} \text{Poder calorífico inferior PCI} &= 9000 - 885 = \\ &8115 \text{ Kcal/m}^3 \end{aligned}$$

### 2.2.2. Límites de inflamabilidad - aire primario

Si al colocar una pequeña cantidad de gas en una atmósfera cerrada de aire y se intenta encender la mezcla, puede observarse que solamente en contados casos tiene lugar combustión ó explo-sión. La fig. 2.1 muestra los límites de in-flamabilidad correspondientes a varios compo-nentes importantes de los gases. El gráfico - indica que cuanto más ligeros son los componen-tes, especialmente el hidrógeno, más amplios son los límites de inflamabilidad. Y, a medida que aumenta el peso molecular en un determinado compuesto, los límites decrecen y la zona se desliza hacia la izquierda, o sea hacia el lado de menor porcentaje de gas en el aire.

Si queremos gas en el extremo de una tubería cerrada, todo el gas debe luchar para obtener el aire necesario a la combustión en la superfi-cie exterior. El calor producido es radiado ha-cia el interior de los gases no quemados, con lo que, si se trata de hidrocarburos, se operará un "cracking" ó descomposición en partículas de car-

bón. Estas se calientan hasta llegar a la incandescencia produciendo una llama amarilla, brillante. No es sólo carbón sino óxido de carbono indicando que existe defecto de aire o, más concretamente de oxígeno.

Para eliminar una llama incandescente e incrementar la eficacia de la combustión, es necesario suministrar aire suficiente para permitir la combustión completa de los hidrocarburos con la producción de anhídrido carbónico y agua, antes de que el calor producido pueda descomponer a los hidrocarburos gaseosos en carbono, negro de humo, ó en formas más estables de carbono que se resisten a combinarse con el oxígeno e incluso en los bordes de la llama.

Si añadimos aire al gas antes de la combustión, el gas no precisa acudir a la atmósfera exterior para encontrar  $O_2$ .

TABLA 2.6

PODER CALORIFICO DE LOS COMPONENTES EN LOS  
LIMITES DE INFLAMABILIDAD SUPERIORES

H <sub>2</sub> - Hidrógeno	2160	Kcal/kg
CH <sub>4</sub> - Metano	1335	"
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> -Etano	1960	"
CO - Oxído de carbono	2140	"
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> -Propano	2310	"
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> -Propileno	2350	"
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> -Butileno	2740	"

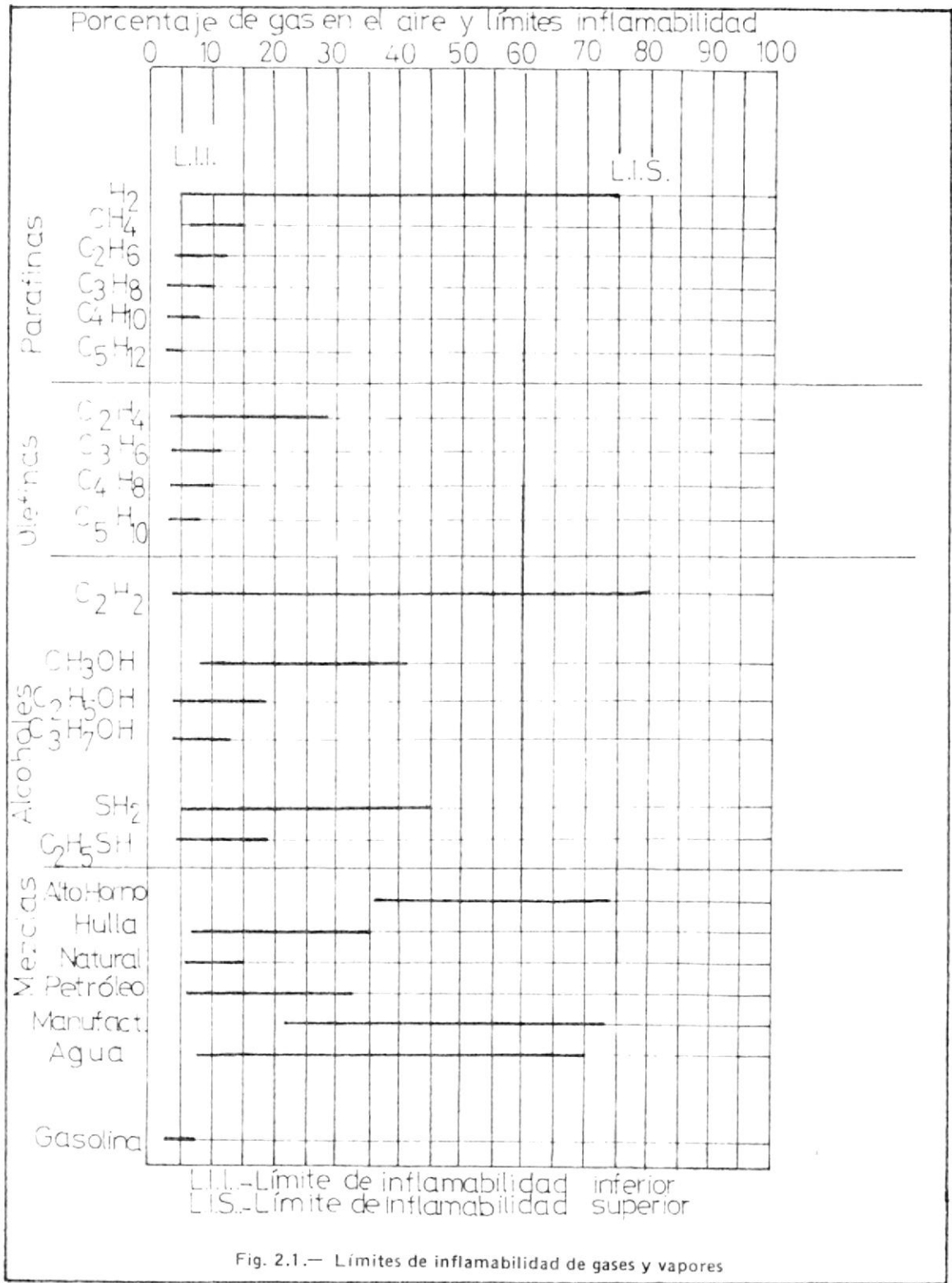


TABLA 2.7  
PODER CALORIFICO Y AIRE NECESARIO PARA  
LA COMBUSTION COMPLETA

COMPONENTES	PODER CALORIFICO Kcal/Kg	AIRE NECESARIO PARA LA COMBUST. COMPLETA m <sup>3</sup> aire/m <sup>3</sup> gas
Hidrógeno	2900	2,38
Oxido de carbono	2860	2,83
Metano	9000	9,53
Etano	15950	1,67
Propano	23100	23,8
Butano	29980	30,97

La mezcla ardería más rápidamente produciendo un importante aumento en el rendimiento de la combustión. La cuestión que esto plantea es - ¿Cuál es la cantidad óptima de aire que debemos añadir al gas?

La figura 2.2b muestra un corte transversal de un mechero bunsen en el que se puede ver la equivalencia con un quemador atmosférico del tipo de los empleados en la mayor parte de los aparatos de utilización. Cuando se añade aire al gas, los límites de inflamabilidad de la figura 2.1 están cercanos al lado de 100% en gas. De esta forma la máxima cantidad de aire que puede añadirse antes de que se produzca retroceso de llama o soplado de la misma, coincide con el límite de inflamabilidad superior para cada tipo determinado de gas. La cantidad mínima es naturalmente cero de aire con lo que tendremos una llama amarilla brillante si el gas tiene hidrocarburos.

Considerando las características ampliamente diversas y la composición química de los diferentes gases, es interesante notar que el poder calorífico de los gases, cae en un margen estre-

cho en los límites explosivos superiores. En la tabla 2.6 pueden verse los poderes caloríficos de los componentes más corrientes de los gases en los límites de inflamabilidad superiores.

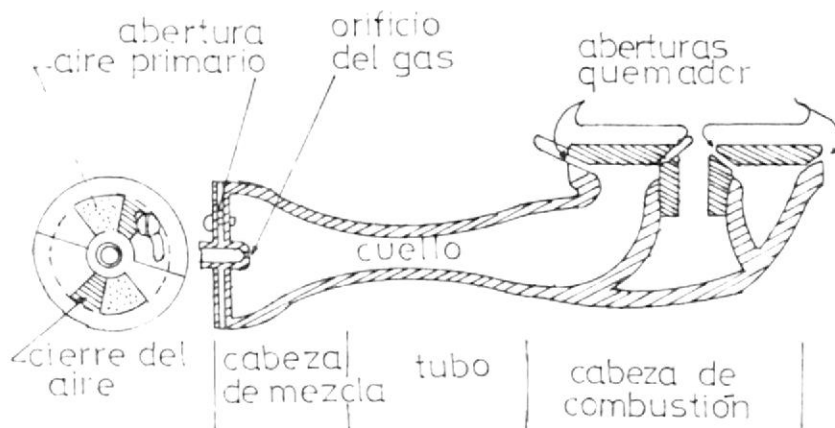


Fig. 2.2a.— Quemador de gas atmosférico

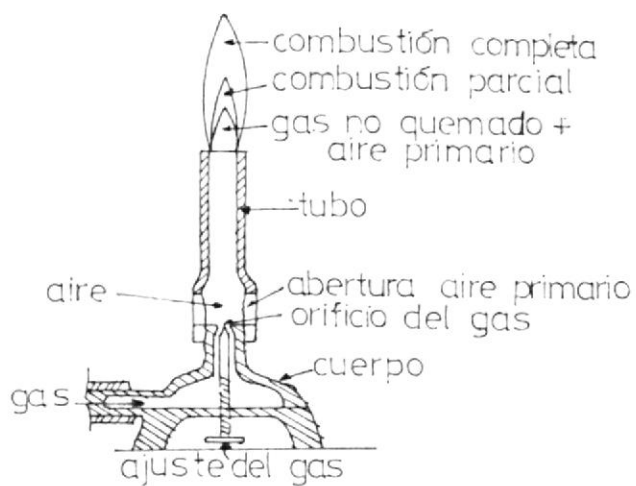


Fig. 2.2b.— Quemador bunsen (corte)

Es posible calcular los límites de inflamabilidad empleando la ley de las mezclas aplicada por vez primera por Le-Chatelier

% = Límite en tanto por ciento

$$= \frac{100}{\frac{\% V_1}{\% L_1} + \frac{\% V_2}{\% L_2} + \frac{\% V_3}{\% L_3} + \dots + \frac{\% V_n}{\% L_n}}$$

en donde:

%  $V_n$  = volumen porcentual del componente n.

%  $L_n$  = límite de inflamabilidad del componente n en tanto por ciento.

Cuando las mezclas contienen anhídrido carbónico o nitrógeno, el cálculo debe hacerse asimilándolos a uno de los combustibles, tales como: hidrógeno, óxido de carbón, metano, etc. y emplear entonces los límites de inflamabilidad de la mezcla (determinados en tablas y gráficos ó experimentalmente), en la ecuación considerando la mezcla binaria como un componente. Por este sistema pueden calcularse los dos límites de inflamabilidad superior e inferior.

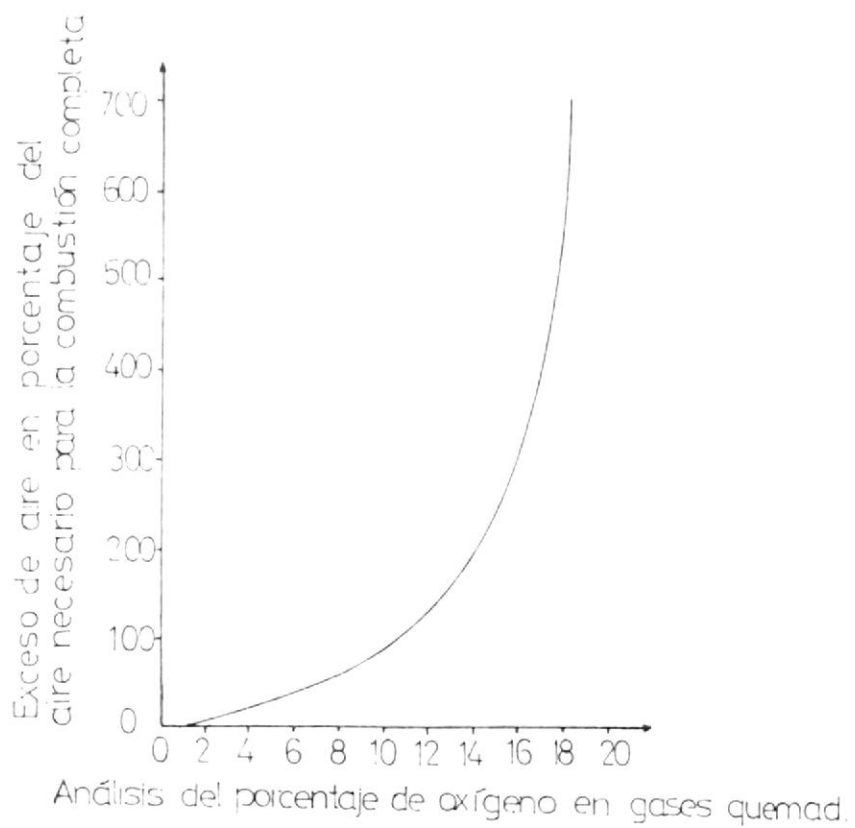


Fig. 2.3.— Exceso de aire en función del %  $O_2$  en los gases quemados.

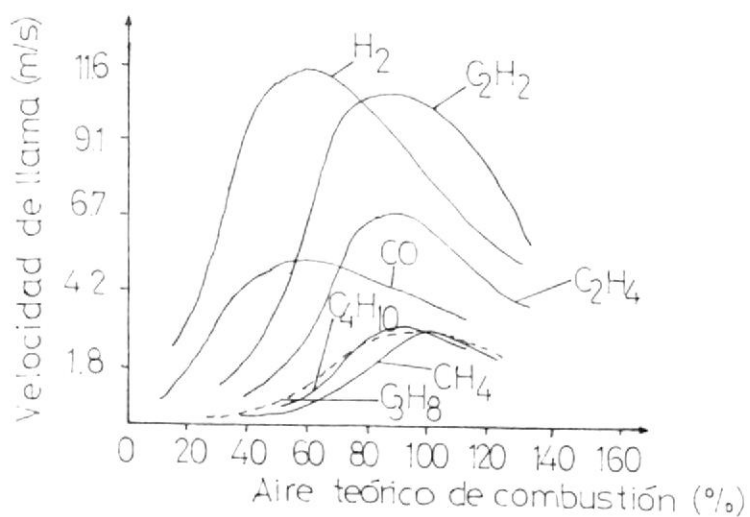


Fig. 2.4.— Porcentaje teórico de aire para la combustión.

2.2.3. Efecto del peso específico, poder calorífico, velocidad de llama, límites de inflamabilidad.

Las mezclas de gases que no son intercambiables se caracterizan por una tendencia a puntas de amarillas y al soplado o retorno de llama cuando el gas de base es reemplazado por otro gas. La aparición de puntas amarillas es consecuencia - de una mezcla de aire primario con exceso de gas. El retorno de llama ocurre cuando quemamos una mezcla de aire primario con defecto de gas. El soplado de llama tiene lugar por una velocidad excesiva del gas en comparación con la velocidad de la llama.

Resumiendo, la mezcla de aire primario es crítica en relación a la velocidad de llama y a los límites de inflamabilidad.

La velocidad de la llama puede determinarse promediando los recorridos de las mezclas de aire-gas a lo largo de un tubo cilíndrico. La figura 2.4 muestra la velocidad de la llama en función del aire primario teóricamente necesario para la combustión completa. La curva muestra el porqué una llama arde frecuentemente fuera de su

lugar, si tenemos presente que la velocidad de llama aumenta cuando el aire se añade a la mezcla, desde los límites inferiores de porcentaje de aire. La caída después del máximo carece de interés a los efectos de las mezclas de aire primario.

#### 2.2.4. Efecto del arrastre de aire primario a causa de cambios de peso específico

El arrastre de aire primario depende de la masa (peso dividido por la aceleración de la gravedad) que pasa a través de un orificio en un período de tiempo determinado y de la velocidad con que pasa. Así pues:

$$\text{Masa de gas que pasa} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Unidad tiempo}} \times \text{densidad}$$

$$= \text{velocidad} \times \frac{\text{orificio}}{\text{área}} \times \text{densidad}$$

$$\text{Velocidad del gas} = \frac{\text{constante orificio}}{\sqrt{\text{densidad}}} = \frac{c_v}{\sqrt{\text{densidad}}}$$

En  $c_v$ : es constante del orificio en otras condiciones fijadas

$$\begin{aligned} \text{Indice de momento} &= \frac{c_v}{\sqrt{a}} \times \text{área} \times d \times \frac{c_v}{\sqrt{d}} \\ \text{de masa} & \\ &= c_v \times \text{área} = \text{constante} \end{aligned}$$

Por tanto al eliminarse la densidad, el índice de momento (bajo unas condiciones determinadas) es independiente de la densidad o peso específico. Puede apreciarse que la velocidad de funcionamiento de un quemador queda afectada solamente por el cambio de caudal de gas, siendo independiente el caudal de aire primario de los cambios de composición.

La inyección de aire a través de la admisión de aire primario es directamente proporcional a la raíz cuadrada del peso específico del gas que atravieza el orificio:

$$\% \text{ aire primario} = \% \text{ volumen aire primario} = \sqrt{p.e.}$$

El gas natural precisa una pequeña proporción de aire primario para asegurar la ignición sin desprendimientos ni retorno de llama.

#### 2.2.5. Velocidad de llama, límites de inflamabilidad

Así como el volumen de aire primario es independiente de la densidad, el porcentaje de aire pri

mario depende de los cambios de volumen del gas.  
La ecuación es:

$$\% \text{ aire primario} = \frac{\text{Volumen de A.P.}}{\frac{C_v}{\sqrt{d}} + \text{Volumen AP}} \approx \sqrt{d} \text{ ó } \sqrt{P.E.}$$

$\alpha$  : "variable con"

Cuando aumenta el porcentaje de aire primario, se desprende hacia el límite de inflamabilidad y la velocidad de llama aumenta, por tanto existirá tendencia al desprendimiento de llama. Esto es cierto, también para los gases inertes, tales como:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$  y también para  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}$ , ver fig. 2.5.

Al variar solamente el hidrógeno y el contenido en inertes, prácticamente no varían los límites de inflamabilidad y no se explica con esto, la tendencia al retorno de llama del gas, con alto contenido en hidrógeno, especialmente cuando la tendencia al retorno de llama del nitrógeno es superior a la del hidrógeno. La explicación se halla en la consideración total de todos los componentes. Cuando aumenta el contenido en hidrógeno, los quemadores lentos (de baja velocidad de llama) desprenden la llama y

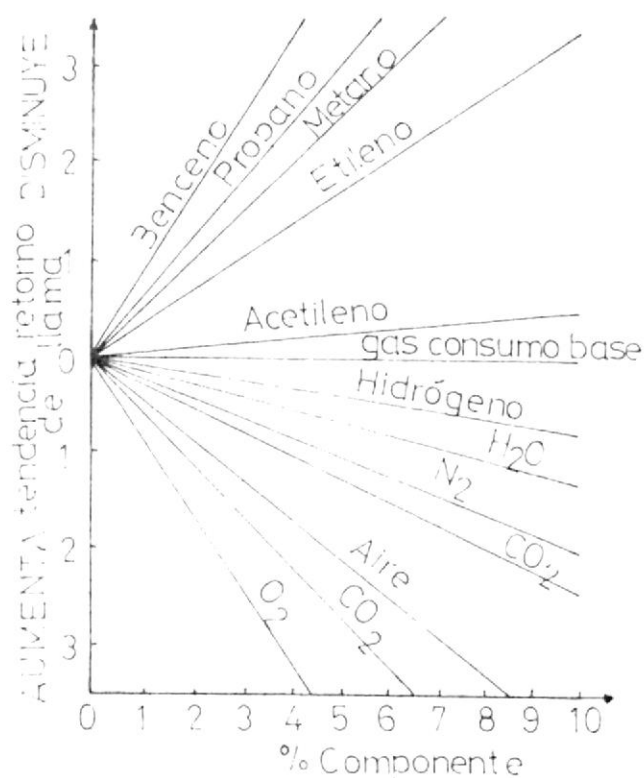


Fig. 2.5.— Tendencia al retorno de llama

viceversa. El límite superior de inflamabilidad de los gases libres de inertes de bajo y alto contenido en hidrógeno debe calcularse con la ley de las mezclas y comparado con el límite superior de inflamabilidad de un gas de petróleo con bajo contenido en hidrógeno de 13.800 Kcal modificado a 8900 Kcal.

En la tabla 2.8 pueden verse los resultados. El etileno, etano, propano, etc. reducen la tendencia al retorno de llama en mayor grado en que

TABLA 2.8

LIMITES SUPERIORES DE INFLAMABILIDAD DE  
VARIAS MEZCLAS DE GASES DE PETROLEO

<u>Poder calorífico del gas</u>	<u>I.S.I. Calculado</u>
13800 Kcal (libre de inertes)	16 %
8900 Kcal (libre de inertes)	21.5 %
Gas modificado de 13800 a 8900 Kcal con 35% de N <sub>2</sub>	26 %
Gas modificado de 11100 Kcal a 8900 Kcal con 20% de N <sub>2</sub>	20 %

el hidrógeno y el N<sub>2</sub> favorecen dicha tendencia, y como el gas modificado de 11.100 Kcal, tiene el límite inferior de inflamabilidad más bajo, éste parece ser a primera vista el mejor gas que debe procurarse. Sin embargo, deben considerarse varios factores más, incluyendo el diseño del quemador, por lo que los resultados experimentales son la única respuesta válida. Refiriéndonos a la fig. 2.2, el gas que pasa a través de un orificio depende exclusivamente de un peso específico, considerando constantes las restantes características; y por naturaleza, el ingreso calorífico depende exclusivamente del volumen de gas y de su poder calorífico.

TABLA 2.9

ANALISIS DEL GAS NATURAL

POZO AMISTAD N° 1

COMPONENTE	MOL POR CIENTO				PROMEDIO
	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	
Metano	98.6	98.35	98.14	98.11	98.3
Etano	.78	.94	1.05	1.07	.96
Propano	.22	.29	.35	.35	.3025
i-Butano	.06	.08	.09	.09	.080
n-Butano	.02	.02	.03	.03	.025
i-Pentano	.02	.02	.02	.02	.020
n-Pentano	.01	.01	.01	.01	.010
Hexanos	trazas	trazas	trazas	trazas	trazas
Heptanos	trazas	trazas	trazas	trazas	trazas
CO <sub>2</sub>	.02	.02	.01	.02	.0175
N <sub>2</sub>	.27	.27	.30	.30	.285
SG GAS	00.00	00.00	100.00	100.00	100.00
	.563	.564	.566	.566	.56475

TABLA 2.10

DETERMINACION DEL PESO MOLECULAR, GRAVEDAD ESPECIFICA, PRESION CRITICA, PRESION CRITICA, TEMPERATURA CRITICA DEL GAS  
 NATURAL (POZO AMISTAD N 1)

COMPONENTE	PESO Mol (N)	Pc (Psi)	T <sub>C</sub> ( R )	Y.P.M.	Y. P <sub>C</sub>	Y.T <sub>C</sub>	PESO Mol Gas	SG GAS	Pc Gas (Psi)	T <sub>C</sub> Gas ( R )
Metano	16.042	673.10	343.30	15.7693	661.66	7.464				
Etano	30.068	708.30	549.77	0.2886	6.799	5.2718				
Propano	44.094	617.40	665.95	0.1334	1.867	2.0145				
i-Butano	58.120	529.10	734.65	0.0465	0.423	0.5877				
n-Butano	58.120	550.70	765.31	0.0145	0.138	0.1913	16.3615	0.5648	672.62	346.52
i-Pentano	72.146	483	829.80	0.01443	0.0966	0.1659				
n-Pentano	72.146	489.5	845.6	0.0072	0.0489	0.08454				
Hexanos										
Heptanos										
CO <sub>2</sub>	44.010	1073	548	0.0077	0.1878	0.0959				
N <sub>2</sub>	28.016	492.0	227.2	0.0798	1.4022	0.6475				

Por tanto:

Así mismo podemos ver que el aire necesario para la combustión completa es proporcional al poder calorífico.

$$\text{Factor de ingreso calorífico} = \frac{\text{P.C.}}{\sqrt{\text{Peso específico}}}$$

## 2.3. TEORIA BASICA SOBRE COMBUSTION: BUNKER C, DIESEL Y GAS NATURAL.

### 2.3.1. Definiciones y Clasificaciones de los principales fenómenos relacionados con la combustión

Por "Combustión", en sentido amplio, puede entenderse toda reacción química relativamente rápida, de carácter notablemente exotérmico, que se desarrolle en fase gaseosa o en fase heterogénea (gas líquido, gas-sólido), sin exigir necesariamente la presencia del oxígeno, con o sin manifestaciones del tipo de llamas o de radiaciones visibles. A su vez, las llamas pueden definirse como reacciones de combustión que se propagan a través del espacio, a velocidad inferior a la del sonido (esta definición no considera las detonaciones y las reacciones de cualquier clase que se verifi-

que a velocidades supersónicas), acompañadas normalmente de radiaciones visibles: su característica de propagación en el espacio en condiciones de velocidad limitada, la diferencia claramente de otras reacciones.

El concepto de llama implica el de movimiento, y por consiguiente, un frente de avance de la reacción, el denominado "frente de llama"; supuesto limitado al volumen de mezcla en la reacción, obtenida la llama su propagación se autoextingue. Si la mezcla destinada a la combustión fluye dentro de un tubo hacia un extremo libre del mismo, en condiciones definidas de flujo, la llama puede quedar aparentemente inmóvil en el extremo libre. Si la velocidad del gas aumenta más allá de un cierto límite, la llama languidece, apagándose por completo; por el contrario, si la velocidad de flujo de la mezcla disminuye sensiblemente, puede producirse el llamado "retorno de llama" dentro del tubo (cuando el tubo es muy largo y el diámetro no demasiado pequeño, la llama al retornar tiende a aumentar su velocidad; si ésta supera un cierto valor crítico, puede transformarse en una detonación: velocidad supersónica de

propagación).

Estas observaciones implican la definición de una "velocidad peculiar de la llama", que es función de la naturaleza del combustible gaseoso, de las condiciones en que se produce la combustión y, en menor medida, de las dimensiones del aparato en que se verifique. Esta velocidad además, depende de la conducción del calor y de la difusión de las partículas activas, originadas en la combustión, en sentido opuesto al del flujo del gas; pero no es muy elevada, dado que la conducción térmica gaseosa que condiciona los resultados sigue un proceso lento y puede variar entre unos pocos cm/seg. (mezcla estequiométrica hidrógeno-oxígeno). Para que se produzca una llama es necesario tanto la presencia del combustible y del comburente como la de un iniciador; éste puede ser una chispa o una fuente de calor, como un hilo incandescente o una llama piloto.

Para la combustión de una mezcla inflamable, GAYDON, señala que la cantidad mínima de energía necesaria, en el caso de igniciones instantáneas - (chispas) debe ser proporcional a  $1/p^2$  (siendo  $p$  la presión del gas) en el caso de fuentes de ca-

lor permanentes (hilo incandescente, llama piloto) debe tenerse en cuenta el factor tiempo, la geometría del local y el coeficiente de difusión.

Una mezcla inflamable puede encenderse por sí misma si se conduce a una temperatura a la cual la reacción entre el combustible y el comburente alcanza una velocidad suficientemente alta. La ignición visible está precedida por un intervalo de temperaturas en el que se verifican reacciones preliminares de oxidación, a velocidad más lenta. La temperatura límite, más allá de la cual se produce siempre la ignición, se denomina de autoencendido. Para valores en torno a esta temperatura se verifica un cierto retardo en la ignición, llamado "período de inducción", que tiende a ser menos duradero a medida que crece la temperatura. Esta, a su vez, depende de la naturaleza de las paredes del recipiente de la presión y de la presencia de catalizadores o inhibidores de la combustión. Observando el comportamiento de la mezcla aire-metano al crecer la temperatura, puede apreciarse, en determinadas condiciones, la formación de las denominadas "llamas frías", fenómenos luminosos que se distinguen de las llamas normales por su baja temperatura y por su espectro, caracterizado por

la presencia de bandas de formalina (en lugar de bandas de los radicales C-C y CH asociados a las combustiones normales).

### 2.3.2. Condiciones límite para que se produzca llama

#### a) Límites de inflamabilidad

Partiendo de mezclas estequiométricas de combustible-comburente, y procediendo en la escala de las concentraciones tanto hacia mezclas más ricas como hacia las más pobres en combustible, se llega en ambos casos a mezclas límite, en las cuales el calor producido por un volumen de la mezcla en combustión resulta insuficiente para propagar la llama, en el ambiente circundante, por difusión molecular y térmica; ambos límites marcan el superior e inferior de inflamabilidad (tabla 3.1). Vienen dados por el porcentaje de concentración del combustible en la mezcla combustible-comburente. En general, los límites corresponden a mezclas que dan lugar a bajas temperaturas de combustión, en las cuales no puede propagarse la llama (dicho de otra manera, se tiene una pérdida de energía, por lo que la mez

cla circundante no puede alcanzar la temperatura de ignición). Los valores de ambos límites cambian mediante variaciones de la presión y la temperatura.

b) Límites de temperatura

Además de los límites de inflamabilidad vistos, tenemos límites de temperatura, definidos por las temperaturas máximas y mínimas a que pueden encontrarse los gases que intervienen en la combustión, respectivamente en el instante inicial del encendido y en el instante final, como productos quemados (campo de temperatura de la llama).

c) Límites de presión

Los límites de presión definen el intervalo de presiones dentro del cual puede existir una llama; se ha hecho experiencias demostrativas al respecto y se ha constatado que, por lo que se refiere al límite inferior, que está por debajo de las  $10^{-3}$  atmósferas, todas las llamas tienden a extinguirse. El límite superior es muy difícil de determinar, debido a la peligrosidad

de la mezcla; hasta el momento se han conseguido combustiones a presiones de hasta unas 100 atmósferas.

d) Efecto pared (Quenching)

Debe aún consignarse, por su aspecto "limitador", el llamado "efecto pared" de las paredes sobre la llama. Puede advertirse este fenómeno observando una llama que sale de un tubo; debido a las pérdidas de calor localizadas en la zona de contacto con los bordes y a los efectos de difusión en la pared de los elementos activos a través de los cuales se desarrolla la combustión, en torno de los bordes se centra una parte de la reacción, por lo cual la llama queda claramente destacada del quemador.

### 2.3.3. Aspectos químicos de la combustión

En el estudio de los fenómenos relacionados con la combustión, la química desempeña un papel fundamental, ya que las reacciones combustible-comburente constituyen la base del proceso; en realidad, los fenómenos se desarrollan de manera muy compleja, dado que las reacciones se producen con

los fluidos en movimientos y con fuertes variaciones de temperatura: por lo tanto, en un análisis minucioso hay que tener en cuenta la distribución espacial heterogénea de las magnitudes químico-físicas que caracterizan en cada momento la mezcla reactiva.

Las leyes que regulan la transmisión del calor y el transporte de masa controlan en bastantes casos el proceso, puesto que las reacciones químicas son generalmente mucho más rápidas; en diversos tipos de combustión, la mezcla del combustible con el oxidante constituye de hecho el paso que determina la velocidad total del conjunto.

Desde el punto de vista químico, adquiere fundamental importancia el nivel térmico alcanzado por los fluidos en reacción: mientras en las llamas con aire las temperaturas son relativamente bajas, en las llamas con oxígeno, de no darse fenómenos de disociación, se podrían alcanzar valores muy altos. Por ejemplo, una llama de metano-oxígeno (1:2) contienen cerca del 20% de radicales y átomos libres; la presencia de estos elementos disociados reduce la temperatura de la llama de 5050°C (valor teórico) a sólo 2740°C. La energía exigida por esta di

sociación se libera posteriormente por el progresivo enfriamiento de los gases mediante reacciones masivas de recombinación.

La observación experimental de los fenómenos pirólíticos relacionados con el combustible antes de llegar al frente de llama, también constituye un aspecto químico interesante, lo mismo que el papel desempeñado por los radicales, que transportan energía y son responsables de las combustiones de tipo explosivo.

#### 2.3.4. Combustión de productos líquidos

Los productos líquidos más usados son el kerosene, el gasoil, los aceites combustibles ligeros y pesados y el alquitrán de petróleo y de carbón.

Los combustibles líquidos presentan las siguientes ventajas:

- a) poder calorífico constante para cada producto;
- b) facilidad de almacenamiento;
- c) contenidos escasísimos de cenizas;
- d) simplicidad en los dispositivos de alimentación y de medidas en las instalaciones;
- e) facilidad de control de las características del

producto por parte del usuario.

Con los combustibles líquidos, es difícil obtener productos de combustión de acción reductora (necesarios en ciertas operaciones industriales especiales) sin dar lugar a una formación simultánea de sólidos no quemados; por lo demás, es imposible evitar en estos combustibles, de modo semejante a como ocurre en los combustibles sólidos y a diferencia de los gaseosos, algunas impurezas, como - por ejemplo, el azufre, sin recurrir a operaciones económicamente muy costosas (de manera especial para los productos más pesados).

Los combustibles líquidos están constituidos esencialmente por hidrocarburos parafínicos nafténicos y aromáticos de distintos grados de ebullición con pequeñas cantidades de azufre, nitrógeno y a veces oxígeno en combinación química.

La composición media de los hidrocarburos varía - con el peso específico del producto; el kerosene tiene generalmente su dependencia en la fuente de origen lo cual influye en las propiedades del producto final. La composición química del gasoil es muy semejante a la de los kerosenes (parafinas, - naftenos, aromáticos, etc.).

La composición química de los aceites combustibles es todavía más compleja; para su identificación se emplea generalmente la relación entre sus porcentajes de carbono e hidrógeno. Esta relación aumenta si se pasa de los productos más ligeros a los más pesados, y tiene gran influencia en muchas propiedades del combustible, en condiciones de no excesiva turbulencia, se caracterizan por llamas muy luminosas y radiantes, la emisividad de la llama (ó poder emisor) depende de la técnica de combustión y de la relación C/H. De esta relación dependen también el peso específico y la viscosidad del producto; su aumento supone también el del peso específico y de la viscosidad. Todos los aceites contienen una cierta cantidad de agua emulsionada (del 0.1% al 1% y más, según el peso específico del producto). Con el tiempo, el agua se separa, depositándose en el fondo de los recipientes, y debe purgarse a intervalos regulares. Cuando está presente en los conductos, el agua hace a la llama inestable y puede llegar a extinguirla.

El contenido de azufre en los aceites combustibles puede variar en una proporción de cerca de 0.5 %

a 8% en peso, o más. El azufre se presenta en forma de varios compuestos (sulfuros, mercaptanos, compuestos heterocíclicos, etc.) y es un componente perjudicial por las siguientes razones:

- sus productos de combustión originan serios problemas de corrosión.
- da origen a depósitos, formados preferentemente por sulfatos de los metales contenidos en el aceite.
- en las aplicaciones en que la llama va directamente en contacto con los materiales a tratar como en la industria cerámica, del vidrio, metalúrgica, pueden originarse, en presencia de los compuestos de azufre, serias complicaciones por lo que respecta a la calidad de los productos;
- algunos tipos de compuestos sulfurados, como los tifenales, pueden dar lugar a la formación de gomas y sedimentos en los aceites combustibles destilados y ocasionar problemas en el movimiento del líquido.

Los combustibles líquidos pesados presentan un contenido en sustancias minerales (cenizas) que a veces supera al 0.25% en peso. La composición química de las cenizas varía según la procedencia del

crudo, los componentes más comunes son el calcio, magnesio, hierro, níquel y sodio, vanadio, junto a otros elementos en pequeñas cantidades. Las cenizas proceden de las impurezas inorgánicas presentes en el crudo.

Las cenizas pueden dar lugar a reducciones de transmisiones del calor, a causa de los depósitos que pueden formar en los tubos, y de otros inconvenientes, por ejemplo:

- deterioro rápido de los materiales refractarios de los hornos (debido especialmente a la presencia de sodio en el combustible).
- reacciones químicas que pueden alterar los materiales en contacto con la llama (decoloración por ejemplo, del vidrio de alta calidad por efecto del vanadio).
- corrosiones sensibles a causa de depósitos en estado fundido (muchos compuestos aparecidos en los depósitos tienen un punto de fusión entre los 600° y 900°C).

Los combustibles líquidos, por estar constituidos principalmente por carbono e hidrógeno, al quemarse con el aire dan lugar a anhídrido carbónico y agua acompañados del nitrógeno del aire de combus

ción y del aire en exceso.

En los productos derivados del petróleo, la canti  
dad teórica de anhídrido carbónico en los humos  
secos está generalmente comprendida entre el 15  
y el 16%. Como no es posible, ni siquiera con quem  
adores de alta precisión, obtener una combustión  
completa sólo con el aire teórico, es necesario -  
trabajar siempre con excesos de aire: el CO<sub>2</sub> de los  
humos secos desciende hasta alcanzar valores en  
torno al 11-12%.

( El aire utilizado para la combustión de productos  
líquidos viene precalentado a temperaturas de 250-  
260°C, y ello sobre todo para aumentar la veloci-  
dad de combustión, y por tanto, aumentar la temper  
atura de llama.

En las tablas B1 y B.2 se pueden apreciar constant  
es de combustión y propiedades físicas de los dist  
intos elementos constituyentes de los combusti-  
bles.

### 2.3.5. Combustión de mezclas gaseosas

Los combustibles gaseosos más importantes son el gas natural, los gases de refinería, los gases licuados del petróleo (GPL) y los gases técnicos (gas de ciudad y similares).

El gas natural tiene una composición muy variable: en algunos casos está constituido casi exclusivamente por metano, y en otros, por una mezcla de metano y de hidrocarburos más pesados (etano y homólogos de la serie parafínica) junto con anhídrido carbónico, nitrógeno, según el origen.

Debido a la uniformidad de su composición, facilidades de control y de medida, y simplicidad de los dispositivos de combustión, el gas natural puede considerarse como el combustible ideal para un gran número de aplicaciones.

Los gases de refinería comprenden una gran variedad de tipos: se denominan de hecho con este nombre todas las mezclas gaseosas obtenidas en los procesos de refinado. Los gases de refinería están constituidas por subproductos de los procesos térmicos o catalíticos de cracking, y se compone de una mezcla de hidrocarburos parafínicos (meta-

no, etano, propano, butano y pentano) y de hidrocarburos no saturados (desde el etileno hasta los C<sub>5</sub>) junto al H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>.

Los gases de petróleo licuados (GPL) están constituídos por mezclas de hidrocarburos C<sub>3</sub>-C<sub>4</sub>, saturados y no saturados; los gases técnicos son mezclas de poder calorífico diverso, constituídas por hidrógeno (hasta el 50%), hidrocarburos, especialmente metano, y otros gases combustibles junto a una cierta cantidad de gases inertes.

La combustión de las mezclas gaseosas es evidentemente más sencilla que la de los combustibles líquidos, puesto que la unión con el comburente, operación que determina la calidad de la combustión, es mucho más fácil de lograr; la sustitución de una mezcla por otra en un quemador determinado implica problemas de intercambios de los productos, relacionados con las características del quemador y con la cantidad de aire necesaria para la combustión, la velocidad de la combustión de los respectivos gases y la cantidad de gas distribuido (además del poder calorífico y la densidad).

Desde el punto de vista estrictamente químico, el mecanismo de la combustión de las mezclas no se di

ferencia sustancialmente del de los componentes puros; la combustión se favorece con el precalentamiento del aire comburente y de la mezcla gaseosa en reacción.

Las llamas de los combustibles gaseosos, por contener solamente anhídrido carbónico, vapor de agua y nitrógeno, tienen una emisividad relativamente débil; en el nitrógeno es prácticamente nula, mientras que en el anhídrido carbónico y en el vapor de agua alcanza valores no muy elevados. Para que una llama sea luminosa debe contener en suspensión partículas sólidas (carbono) que irradian como un cuerpo negro; es posible obtener llamas de emisividad relativamente alta ( $\epsilon \sim 0.4$ ), a partir de combustibles gaseosos mediante un cracking parcial de los hidrocarburos durante el proceso de oxidación, o sea, haciendo proceder la combustión propiamente dicha de una fase preliminar de reacción con defecto de aire.

#### 2.3.6. Breve resumen de la estequiometría de la combustión

Para que un combustible arda completamente, es necesario que el hidrógeno y el carbono contenidos en el mismo se transformen por reacción con el

oxígeno en agua y anhídrido carbónico. Si la transformación se realiza parcialmente, la com bustión se denomina incompleta: el carbono da lugar en este caso, aparte del  $\text{CO}_2$  a una cierta cantidad de óxido de carbono  $\text{CO}$ , y parte del hidrógeno puede encontrarse entre los gases li bres o en forma de hidrocarburos.

Para lograr una combustión completa, es neces ario ante todo mezclar el combustible con una cantidad suficiente de aire, o mejor de oxígeno. Como es prácticamente imposible efectuar u na mezcla de los dos reactivos, hay que sumi nistrar generalmente una cantidad de aire superior a la prevista en teoría, es decir, trabajar con exceso de aire.

Como es obvio, cuanto más elevado es el grado de mezcla obtenido, menor es la cantidad de ai re que se necesita para completar la combustión: por esta razón, los combustibles gaseosos, a causa de su naturaleza que facilita la mezcla, necesitan menor exceso de aire que los combustibles líquidos; éstos precisan notables canti dades en exceso, variables según el tipo, dimensiones y disposición de los quemadores en las

cámaras de combustión. Un exceso de aire demasiado fuerte produce efectos negativos, ya que hace bajar la temperatura de combustión y consiguientemente reduce el rendimiento de los equipos.

Cuanto mayor es la temperatura de combustión, más rápida es la vaporización y la gasificación del combustible y menor es la probabilidad de que los gases o vapores no ardan o lo hagan sólo parcialmente; a estos efectos positivos hay que añadir los fenómenos de descomposición de los productos de la combustión y la obtención de productos de oxidación parcial. Junto a los gases - sin quemar pueden encontrarse en los humos partículas sólidas (hollines) que en parte se vierten al exterior junto con los gases y en parte quedan en el interior, depositándose en los puntos de menor velocidad del gas.

La formación del carbono nace de la mala transformación de los hidrocarburos o de las sustancias carbonosas de los combustibles sólidos: el hidrógeno en general arde fácilmente, mientras que los fragmentos de hidrocarburos del tipo  $C_2$  pueden originar la formación de hollines.

Si los fragmentos moleculares que se originan por

el cracking parcial tiende a combinarse para formar alquitrán, el humo adquiere un color amarillo oscuro, con depósitos de hollines de aspecto brillante.

Una combustión sin humos da lugar a gases que contienen  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  (en forma de vapor),  $\text{O}_2$  y  $\text{N}_2$ ; con los combustibles que contienen azufre aparecen también  $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_3$ .

El análisis de los gases facilita un medio de valorar el grado de combustión alcanzado; puede efectuarse por medio del clásico aparato de Orsat,

La marcha de la combustión puede establecerse basándose en el porcentaje de  $\text{CO}_2$  en los gases quemados; y puesto que el exceso de aire hace aumentar la cantidad de gases producidos, el porcentaje de  $\text{CO}_2$  es siempre inferior al valor estequiométrico.

Para una combustión con exceso de aire y con un combustible prácticamente sin hidrógeno, la suma de  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  se acerca al 21%: los porcentajes en  $\text{CO}_2$  y en  $\text{O}_2$  son complementarios, y función del exceso de aire empleado.

Para los controles prácticos de la combustión son útiles algunas fórmulas; el cálculo inmediato del poder calorífico y de los datos inherentes a los productos de la combustión puede deducirse fácilmente, si se conoce la composición centesimal del combustible como se verá más adelante.

El poder calorífico, que se expresa en kilocalorías, es la cantidad de calor producida en la combustión de 1 Kg de combustible sólido ó líquido o de 1 m<sup>3</sup> normal de combustión gaseoso. Si el material contiene hidrógeno, se produce agua, la cual, según su estado, líquido o gaseoso, aporta nuevas calorías al balance de la combustión, de ahí la distinción entre poder calorífico superior y poder calorífico inferior.

Como en las combustiones industriales los humos salen a una temperatura en la que el agua es todavía gaseosa, resulta que el valor práctico de un combustible está representado efectivamente por su poder calorífico inferior.

Considerando aproximadamente igual a 600 Kcal el valor de condensación de 1 Kg. de vapor de

agua, el poder calorífico inferior PCI, de un combustible resulta menor que el superior PCS en una cantidad proporcional a la cantidad de agua procedente de la combustión, o relacionada de alguna manera con el combustible:

$$PCI = PCS - 600 (U + 9H)$$

U: es el porcentaje de humedad del combustible, referido a la unidad y

H: es porcentaje de hidrógeno

Veamos la deducción del PCS:

- Obtenemos el hidrógeno disponible al que llamamos  $H^*$ , llamando H al hidrógeno presente en el combustible y O al oxígeno en Kg por Kg de combustible.

$$H^* = H - \frac{O}{8}$$

- 1 mol/gr de C;  $\frac{12}{1000}$  Kg desprenden ... 97.6 cal.

C Kg desprenderán  $C \times 97.6 \times 1000/12 = 8100 \times C$  cal.

- 1 mol/gr de H;  $2/1000$  Kg desprenden ... 68.96 cal.

H Kg desprenderán  $H \times 68.96 \times 1000/2 = 34200 H$  cal.

- 1 mol/gr de S;  $32/1000$  Kg desprenden ... 70.72 cal.

S Kg desprenderán  $S \times 70.72 \times 1000/32 = 2210 S$  cal.

Por tanto:

$$PCS = 8100 C + 3420 \left( H - \frac{0}{8} \right) + 2210 S$$

$$PCI = 8100 C + 28800 \left( H - \frac{0}{8} \right) + 2210 S - 600 U$$

## 2.3.7. Cálculos con el Bunker C

AIRE ESTEQUIOMETRICO

COMPOSICION GRAVIMETRICA	REACCION	REQUERIMIENTO PARA UNA COMBUSTION TEORICA PERFECTA Kg/Kg BUNKER C	
		O <sub>2</sub>	AIRE SECO
C = 0.8666 O <sub>2</sub> = 0.0043	C + O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub>	x 2.67 = 2.3138	x 11.53 = 9.9919
H <sub>2</sub> = 0.1157	H <sub>2</sub> + 1/2 O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O	x 7.94 = 9.9187	x 34.34 = 3.9731
S = 0.0121 1.0000	S + O <sub>2</sub> → SO <sub>2</sub>	x 1.00 = 0.0121 3.2446	x 4.29 = 0.0519 14.0169

Aire teórico para combustión perfecta = 14.0169 Kg/aire/Kg Bunker C

## PRODUCTOS DE COMBUSTION

N<sub>2</sub> : el nitrógeno que no reacciona, será:

$$14.0169 - 3.2446 = 10.7723$$

CO<sub>2</sub>: los 0.86666 Kg de C existentes en 1 Kg de Bunker C producen

$$0.8666 (2.67 + 1) = 3.1804$$

H<sub>2</sub>O: el vapor de agua que se forma con los 0.1157 Kg de H<sub>2</sub> es:

$$0.1157 (7.94 + 1) = 1.0344$$

SO<sub>2</sub>: el azufre, del que hay 0.0121 Kg en 1 Kg de BUNKER C dará lugar a:

$$0.0121 (1 + 1) = 0.0242$$

Dando un total ponderal de:

$$10.7723 + 3.1804 + 1.0344 + 0.0242 = 15.011 \frac{\text{Kg de humos h\u00fam.}}{\text{Kg de BUNKER C}}$$

Donde condensado el vapor de agua quedar\u00e1n

$$13.98 \frac{\text{Kg de HUMOS SECOS}}{\text{Kg de BUNKER C}}$$

Los valores para realizar los c\u00e1lculos con los datos de combustible son obtenidos de la tabla B.2. En similar forma los c\u00e1lculos posteriores se har\u00e1n tomando los valores necesarios de la tabla mencionada.

CALCULOS MOLARES CON EL BUNKER C Y TEMPERATURA DE ROCIO

COMPOSICION GRAVIMETRICA	MOLES 100 Kg COMB.	REQUERIMIENTO PARA LA COMBUSTION	
		O <sub>2</sub>	Moles/ 100 Kg AIRE SECO
C = 86.66 \u22c5 12	= 7.22 x 1	= 7.22	
	x 4.76		= 34.37
H <sub>2</sub> = 11.57 \u22c5 2	= 5.79 x 0.5	= 2.9	
	x 2.38		= 13.78
O <sub>2</sub> = ---			
S = 1.21 \u22c5 32	= 0.04 x 1	= 0.04	
	x 4.76		= 0.19
<u>100.00</u>	<u>13.05</u>	<u>10.16</u>	<u>48.34</u>
		+ 0.01	0.06
		<u>10.15</u>	<u>48.28</u>

$$\text{Aire molar te\u00f3rico para combusti\u00f3n} = 48.28 \frac{\text{Mol Aire}}{\text{Mol Combustible}}$$

PRODUCTOS DE COMBUSTION

						<u>Mol Humos</u>
						Mol combustible
CO <sub>2</sub> :	7.22	x	1	=	7.22	
H <sub>2</sub> O :	5.79	x	1 + 1.01 *	=	6.8	
SO <sub>2</sub> :	0.04	x	1	=	0.04	
N <sub>2</sub> :	48.28	x	0.79	=	38.14	
<u>Moles Humos húmedos</u>						52.2
Moles combustible						

$$\frac{\text{Moles Humos seco}}{\text{Moles combustible}} = 52.2 - 6.8 = 45.4$$

$$* = \frac{48.28 \times 29 \times 0.013}{18} = 1.01 \quad (\text{moles H}_2\text{O en aire})$$

La presión parcial se obtiene de:

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{6.8}{52.2} \times 100 = 13\%$$

$$\frac{6.8}{52.2} \times 14.7 = 1.91 \quad \text{psia}$$

La temperatura de saturación es:

$$T_{\text{punto rocío}} = 51.3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (124.35^\circ\text{F})$$

PODER CALORIFICO DEL BUNKER C

C: 8666  
 O: 0.0043  
 H: 0.1157  
 S: 0.0121  
 Ceniza: 0.0003

Poder calorífico inferior:

$$\begin{aligned} \text{PCI} &= 8100 \text{ C} + 28800 \text{ H} - \frac{0}{8} + 2210 \text{ S} - 600 \text{ U} \\ &= 8100 \times 0.8666 + 28800 \times 0.1157 - \frac{0.0043}{8} \\ &\quad + 2210 \times 0.0121 - 600 \times 0.0694 \end{aligned}$$

$$\text{PCI} = 10321.22 \text{ Kcal/Kg}$$

Poder calorífico superior:

$$\begin{aligned} \text{PCS} &= 8100 \text{ C} + 34200 \text{ H} - \frac{0}{8} + 2210 \text{ S} \\ &= 8100 \times 0.866 + 34200 \times 0.1157 - \frac{0.0043}{8} \\ &\quad + 2210 \times 0.0121 \end{aligned}$$

$$\text{PCS} = 10.984.76 \text{ Kcal/Kg}$$

NOTA: Debido a las diferentes composiciones que trae este combustible en que el PCalorífico tanto superior como inferior oscilan en determinados rangos. Se ha tomado en forma oficial para cualquier cálculo como PCI del Bunker el valor de 10.400 Kcal/Kg.

CALCULO TEORICO DE LA DENSIDAD DE LOS GASES COMBUSTIONADOS

	Kg/Kg BUNKER	%	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )
CO <sub>2</sub> :	3.1804	0.2119	1.8741
H <sub>2</sub> O :	1.0344	0.0689	0.76213
SO <sub>2</sub> :	0.0242	0.0016	2.77591
N <sub>2</sub> :	10.7723	0.7176	1.19157

$$\rho = 1.31 \text{ Kg/m}^3$$

CALCULO TEORICO DE LA DENSIDAD DE LA MEZCLA (COMBUSTIBLE +  
COMBURENTE) AL COMBUSTIONARSE

	COMPOSICION GRAVIMETRICA Kg/Kg BUNKER	%	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )
C :	86.66 → CO <sub>2</sub> : 7.22	0.141	1.8741
O <sub>2</sub> :	0.43		
H <sub>2</sub> :	11.57 → H <sub>2</sub> O : 5.79	0.1131	0.76213
N <sub>2</sub> :	N <sub>2</sub> : 38.14	0.7451	1.19157
S :	1.21 → SO <sub>2</sub> : 0.04	0.00078	2.77591

$$\rho = 1.24 \text{ Kg/m}^3$$

TEMPERATURA DE COMBUSTION TEORICA

$$T = \frac{PCI}{\sum (n C_p)}$$

(nC<sub>p</sub>) = masa de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y N<sub>2</sub> multiplicados por sus respectivos calores específicos.

	Kg/Kg Bunker	Densidad	Masa	Calor específico
CO <sub>2</sub>	3.1804	1.8741	1.6970	0.1989
SO <sub>2</sub>	0.0242	2.77591	0.0087	0.273
N <sub>2</sub>	10.7723	1.19157	9.0404	0.2485
H <sub>2</sub> O	1.0344	0.76213	1.3572	0.446
				3.1918

$$T = \frac{10321.22 \text{ Kcal/Kg}}{1.31 (1.697 \times 0.1989) + (0.0087 \times 0.273) + (9.04 \times 0.2485) + (1.3572 \times 0.446)}$$

$$\frac{\frac{m^3}{Kg}}{\frac{m^3}{Kg \text{ Bunker}}} \times \frac{Kcal}{Kg \text{ Bunker } C} \frac{Kg^\circ C}{Kcal}$$

$$T = 2468,45 \text{ }^\circ C$$

Este método se ilustra en la referencia 3 y los datos son obtenidos de la tabla B.1.

CALOR ESPECIFICO DEL BUNKER C:

	Composición gravimétrica Kg/Kg Bunker C	$C_p$	Fracción $C_p$
C:	0.8666	0.2	0.17332
O <sub>2</sub> :	0.0043	0.219	0.00094
H <sub>2</sub> :	0.1157	3.446	0.3987
S:	0.0121	0.19	0.002299
			<hr/> 0.5753

$$C_p = 0.5753 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$$

CALOR ESPECIFICO DE LOS GASES DE ESCAPE DEL BUNKER C

	Composición gravimétrica Kg/Kg Bunker	%	$C_p$	Fracción $C_p$
CO <sub>2</sub> :	3.1804	0.2119	0.1989	0.0421
H <sub>2</sub> O:	1.0344	0.0689	0.4460	0.0307
N <sub>2</sub> :	10.7723	0.7176	0.2485	0.1783
SO <sub>2</sub> :	0.0242	0.2730	0.2730	0.0004
				<hr/> 0.2515

$$C_{pg} = 0.2515 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$$

El volumen de un gas depende de la presión y la temperatura; en los cálculos que siguen se harán en base a condiciones normales, es decir, a 20°C y 760 mm Hg.

En estas condiciones las densidades del CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> son respectivamente 1.8741; 1.19157 y 2.77591 Kg/m<sup>3</sup>.

El volumen de humos secos, reducido a condiciones normales es:

$$\frac{3.18}{1.8741} + \frac{10.77}{1.19157} + \frac{0.024}{2.77591} = 10.74 \text{ m}^3$$

Es interesante desde el punto de vista de su posterior utilización como variable, el cálculo del porcentaje de CO<sub>2</sub> en los humos secos:

$$\% \text{ de CO}_2 = \frac{3.18}{1.8741 \times 10.74} \times 100 = 15.8$$

Este tanto por ciento disminuirá a medida que aumente la cantidad de humos secos en la combustión.

Esto es de gran importancia, ya que la cantidad de humos secos está relacionada con la de aire que entra en el quemador. Si la cantidad de aire es superior a la calculada para una combustión estequiométrica, la de humos aumenta mientras que el CO<sub>2</sub> producido es el mismo,

$$\% \text{CO}_2 = \frac{2.7321}{1.8741 \times 12.52} \times 100 = 11.6450$$

$$\text{CO}_2 = 11.65 \%$$

CALCULO DE LA CANTIDAD DE GRAMOS DE AGUA POR METRO CUBI  
CO DE HUMO SECO

$$f = 1 + Z$$

La misma que para el combustible anterior se asume que  $Z = 0.02$ . La cantidad de aire teórico es de 17.13 Kg/Kg gas natural, para quemar 1 Kg de gas natural se necesitarán:

$$17.13 \times 1.02 = 17.4726 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg Gas Natural}}$$

la diferencia  $17.4726 - 17.13 = 0.3426 \frac{\text{Kg vapor agua}}{\text{Kg Gas Natural}}$

o sea 342.6 gramos de agua por cada Kg de Gas Natural quemado. A esto se añade el agua ocluída en el combustible que siempre se pasa a pesar de los orificios que se instalan para evitarla. Se asume que se halla en un valor de un 2%, por tanto se tiene:

$342.6 + 2221,3 + 20 = 2583,9$  gramos de vapor de  $\text{H}_2\text{O}$  como el volumen de humos secos es:  $12.52 \text{ m}^3$  se tiene:

$$\frac{2583.9}{12.52} = 206,4 \text{ gramos de } \text{H}_2\text{O } \text{m}^3 \text{ de humos}$$

de aquí, que el porcentaje de éste disminuya.

#### CALCULO DEL AIRE TEORICO EN CONDICIONES REALES

Uno de los productos resultantes de la combustión del Bunker C es el vapor de agua, y teniendo en cuenta la posible combinación del mismo con otras sustancias procedentes de la combustión,  $\text{SO}_2$  oxidado a  $\text{SO}_3$ , que puede dar lugar a reacciones químicas, tales como la corrosión de partes metálicas, es interesante estudiar el punto de rocío o temperatura por debajo de la cual el vapor contenido en los humos se condensa.

El vapor de agua que determina la combustión procede de:

1. De la combustión del  $\text{H}_2$  del Bunker C.
2. Del agua existente en suspensión en el combustible debido al transporte, a su calefacción por vapor y a la condensación del vapor de agua atmosférico en los depósitos de almacenamiento.
3. De la humedad relativa del aire de combustión.

Se ha visto que la combustión de 1 Kg de Bunker C produce 1.0344 Kg de vapor de agua. A esta cantidad, que va en los humos, ha de añadirse el agua debido al grado higrométrico del aire y el contenido acuoso del Bunker C.

Considerando una temperatura ambiente de 20°C y 80% de humedad relativa, entonces el agua contenida en el comburente (aire) será igual a 0.02%. Esta cantidad de agua hace aumentar el volumen de comburente, aumento - que se calcula por medio del factor de corrección "F".

$$f = 1 + Z$$

en este caso  $Z = 0.02$ , por tanto

$$f = 1.02$$

Como la cantidad de aire teórico seco es de  $14.0169 \frac{\text{Kg}}{\text{Kg Bunker}}$  se necesita para quemar 1 Kg de Bunker C:

$$14.0169 \times 1.02 = 14.2972 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg Bunker C}}$$

la diferencia de:  $14.2972 - 14.0169 = 0.280 \frac{\text{Kg vapor agua}}{\text{Kg Bunker}}$

o sea 280,3 gramos de vapor de agua por cada Kg de Bunker quemado.

A ésto se añade que el agua ocluída en el Bunker, proviene de sus tratamientos, de su naturaleza, y de la que va enriqueciendo su almacenamiento en depósitos metálicos calentados y enfriados con formación repetida - del punto de rocío. Es habitual encontrar el 2%.

Agrupando estas aportaciones de humedad en los humos de la combustión de 1 Kg de Bunker C tendremos:

$1034,4 + 280,3 + 20 = 1334,7$  gramos de vapor  $H_2O$  como el volumen de humos secos es de  $10.23 \text{ m}^3$ .

$$\frac{1334,7 \text{ gr}}{10.74 \text{ m}^3} = 124,27 \text{ gramos de agua m}^3 \text{ de humos.}$$

$124,27$  gramos de agua por cada  $\text{m}^3$  de humos.

NOTA: en el cálculo no se usará el factor 1.02 pero si se tomará en cuenta la humedad del aire, en función de sus pesos molares como ya se verá más adelante.

#### PUNTO DE ROCIO QUIMICO

Hasta este momento, se ha tenido en cuenta el agua de los gases de combustión y su tensión de vapor. No se ha tomado en cuenta el azufre ni a los productos de su combustión,  $SO_2$   $SO_3$ , este último producido por oxidación del sulfuroso. Estos, no son agresivos en atmósfera seca, pero son altamente corrosivos cuando en presencia de la humedad, el agua se combina con el

anhidrido sulfúrico, dando el ácido. El punto de rocío del  $\text{SO}_4\text{H}_2$  es más elevado que el del vapor de agua; es decir, se condensa a temperaturas más altas. Además, este ácido es fuertemente higroscópico, absorbiendo ávidamente el agua contenida en los humos.

Se puede hablar de un punto de rocío químico, que sería el del sulfúrico, denominado punto de rocío físico al correspondiente al agua.

La acción agresiva comienza en el momento que el sulfúrico se deposita en partes metálicas (calderas, chimeneas, cubiertas de Zn o Al). Por otra parte, los sulfatos que se forman favorecen, por catálisis, la oxidación  $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3$ , aumentando los peligros y la gravedad de las corrosiones.

En la figura 2.6 se muestran las curvas de transformación del anhídrido sulfuroso en sulfúrico, fenómeno que en suma determina la corrosión. Se observa que a temperaturas superiores a los  $800^\circ\text{C}$  la velocidad de dicha reacción de oxidación desciende bruscamente, lo que nos induce a afirmar que en una combustión rápida la transformación será mínima.

Todas las revistas profesionales, todos los textos y monografías consultadas y la propia experiencia coinciden

en que una buena pulverización (fina y homogénea), una mezcla íntima combustible/comburente y un índice de llama bajo y con temperatura de llama altas, reducen los peligros del  $SO_3$  a riesgos semejantes a los habituales de funcionamiento con otros combustibles. Basados en el punto de rocío físico, se debe pensar en que los gases de combustión no tengan nunca temperaturas inferiores a ésta. Pero no solamente los gases, sino también las partes del hogar, los conductos de humos y todas aquellas partes metálicas con las que ellos se encuentran inmediatamente antes de fluir a la atmósfera.

Si se tiene frecuentemente una visión errónea del problema al pensar solamente en la temperatura de los gases y no en la temperatura de los elementos metálicos muy refrigerados o poco expuestos a la influencia del valor producido.

El método más efectivo cómo se corrige la corrosión - es utilizando revestimientos refractarios que actúan como termo-regulador, protegiendo además las partes inferiores de la caldera.

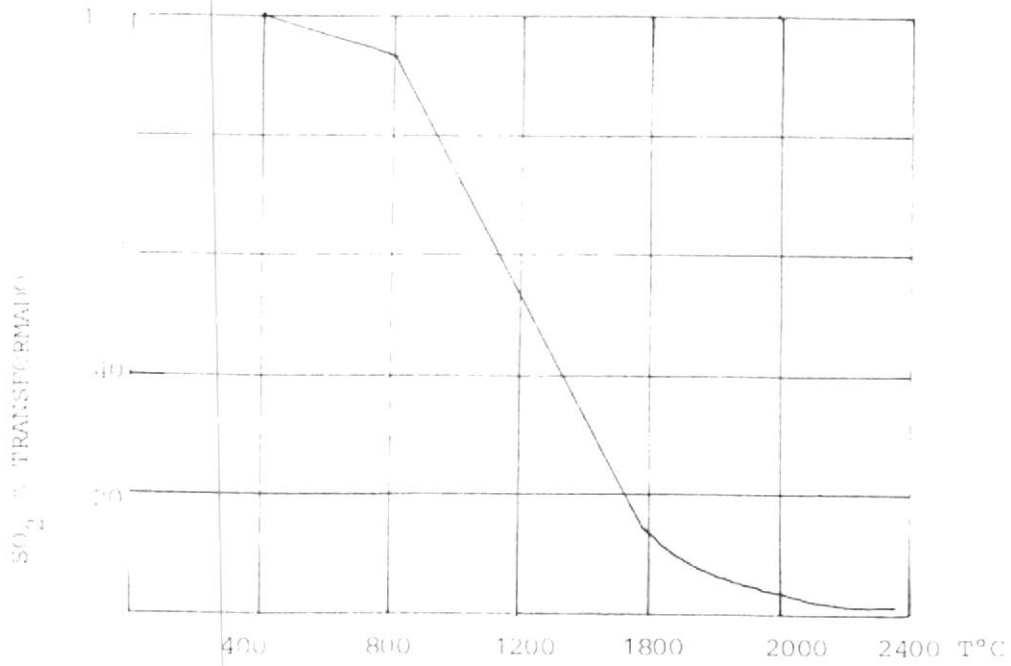


Fig. 2.6.- Curva del Equilibrio  $\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{SO}_3$

## 2.3.8. Cálculos con Gas Natural

CONVERSION DE ANALISIS VOLUMETRICO A GRAVIMETRICO

CH <sub>4</sub> : 98,3 %	$\frac{98.3 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{100 \text{ m}^3 \text{ GN}}$	ó	$\frac{98.3 \text{ Kg mol CH}_4}{100 \text{ Kg mol GN}}$
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> : 0.96 %	$\frac{0.96 \text{ m}^3 \text{ C}_2\text{H}_6}{100 \text{ m}^3 \text{ GN}}$		$\frac{0.96 \text{ Kg mol C}_2\text{H}_6}{100 \text{ Kg mol GN}}$
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> : 0.3025 %	$\frac{0.3025 \text{ m}^3 \text{ C}_3\text{H}_8}{100 \text{ m}^3 \text{ GN}}$		$\frac{0.3025 \text{ Kg mol C}_3\text{H}_8}{100 \text{ Kg mol GN}}$
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> : 0.08 %	$\frac{0.08 \text{ m}^3 \text{ n-C}_4\text{H}_{10}}{100 \text{ m}^3 \text{ GN}}$		$\frac{0.08 \text{ Kg mol n-C}_4\text{H}_{10}}{100 \text{ Kg mol GN}}$
i - C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> : 0.025%	$\frac{0.025 \text{ m}^3 \text{ i-C}_4\text{H}_{10}}{100 \text{ m}^3 \text{ GN}}$		$\frac{0.025 \text{ Kg mol i-C}_4\text{H}_{10}}{100 \text{ Kg mol GN}}$
n- C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> : 0.02%	$\frac{0.020 \text{ m}^3 \text{ n-C}_5\text{H}_{12}}{100 \text{ m}^3 \text{ GN}}$		$\frac{0.020 \text{ Kg mol n-C}_5\text{H}_{12}}{100 \text{ Kg mol GN}}$
i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> : 0.01 %	$\frac{0.01 \text{ m}^3 \text{ i-C}_5\text{H}_{12}}{100 \text{ m}^3 \text{ GN}}$		$\frac{0.01 \text{ Kg mol i-C}_5\text{H}_{12}}{100 \text{ Kg mol GN}}$
CO <sub>2</sub> : 0.0175%	$\frac{0.0175 \text{ m}^3 \text{ CO}_2}{100 \text{ m}^3 \text{ GN}}$		$\frac{0.0175 \text{ Kg mol CO}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}$
N <sub>2</sub> : 0.285%	$\frac{0.285 \text{ m}^3 \text{ N}_2}{100 \text{ m}^3 \text{ GN}}$		$\frac{0.285 \text{ Kg mol N}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}$

## GRAVIMETRICO:

$$\text{CH}_4 = \frac{98.3 \text{ Kg mol CH}_4}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{16 \text{ Kg CH}_4}{\text{Kg mol CH}_4} = \frac{1572.8 \text{ Kg CH}_4}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 = \frac{0.96 \text{ Kg mol C}_2\text{H}_6}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{30 \text{ Kg C}_2\text{H}_6}{\text{Kg mol C}_2\text{H}_6} = \frac{28.8 \text{ Kg C}_2\text{H}_6}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 = \frac{0.3025 \text{ Kg mol C}_3\text{H}_8}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{44 \text{ Kg C}_3\text{H}_8}{\text{Kg mol C}_3\text{H}_8} = \frac{13.31 \text{ Kg C}_3\text{H}_8}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\text{n-C}_4\text{H}_{10} = \frac{0.08 \text{ Kg mol n-C}_4\text{H}_{10}}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{58 \text{ Kg n-C}_4\text{H}_{10}}{\text{Kg mol C}_4\text{H}_{10}} = \frac{4.64 \text{ Kg n C}_4\text{H}_{10}}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\text{i-C}_4\text{H}_{10} = \frac{0.025 \text{ Kg mol i-C}_4\text{H}_{10}}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{58 \text{ Kg i-C}_4\text{H}_{10}}{\text{Kg mol C}_4\text{H}_{10}} = \frac{1.45 \text{ Kg iC}_4\text{H}_{10}}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\text{n-C}_5\text{H}_{12} = \frac{0.01 \text{ Kg mol n-C}_5\text{H}_{12}}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{72 \text{ Kg n C}_5\text{H}_{12}}{\text{Kg mol C}_5\text{H}_{12}} = \frac{1.44 \text{ Kg nC}_5\text{H}_{12}}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\text{i-C}_5\text{H}_{12} = \frac{0.01 \text{ Kg mol i-C}_5\text{H}_{12}}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{72 \text{ Kg iC}_5\text{H}_{12}}{\text{Kg mol C}_5\text{H}_{12}} = \frac{0.72 \text{ Kg iC}_5\text{H}_{12}}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\text{CO}_2 = \frac{0.0175 \text{ Kg mol CO}_2}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{44 \text{ Kg CO}_2}{\text{Kg mol CO}_2} = \frac{0.77 \text{ Kg CO}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\text{N}_2 = \frac{0.285 \text{ Kg mol N}_2}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{28 \text{ Kg N}_2}{\text{Kg mol CO}_2} = \frac{7.98 \text{ Kg N}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\text{Peso molecular del gas} = \frac{1631.91 \text{ Kg Gas Natural}}{100 \text{ Kg mol Gas Natural}}$$

DETERMINACION DEL CARBONO TOTAL:

$$\frac{98.3 \text{ Kg mol CH}_4}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{12 \text{ Kg C}}{\text{Kg mol CH}_4} = \frac{1179.6 \text{ Kg C}}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\frac{0.96 \text{ Kg mol C}_2\text{H}_6}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{24 \text{ Kg C}}{\text{Kg mol C}_2\text{H}_6} = \frac{23.04 \text{ Kg C}}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\frac{0.3025 \text{ Kg mol C}_3\text{H}_8}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{36 \text{ Kg C}}{\text{Kg mol C}_3\text{H}_8} = \frac{10.89 \text{ Kg C}}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\frac{0.08 \text{ Kg mol n-C}_4\text{H}_{10}}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{48 \text{ Kg C}}{\text{Kg mol C}_4\text{H}_{10}} = \frac{3.84 \text{ Kg C}}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\frac{0.025 \text{ Kg mol i-C}_4\text{H}_{10}}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{48 \text{ Kg C}}{\text{Kg mol C}_4\text{H}_{10}} = \frac{1.2 \text{ Kg C}}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\frac{0.02 \text{ Kg mol n-C}_5\text{H}_{12}}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{60 \text{ Kg C}}{\text{Kg mol C}_5\text{H}_{12}} = \frac{1.2 \text{ Kg C}}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\frac{0.01 \text{ Kg mol i-C}_5\text{H}_{12}}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{60 \text{ Kg C}}{\text{Kg mol C}_5\text{H}_{12}} = \frac{0.6 \text{ Kg C}}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\frac{0.0175 \text{ Kg mol CO}_2}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{12 \text{ Kg C}}{\text{Kg mol CO}_2} = \frac{0.21 \text{ Kg C}}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\text{Carbono total} = \frac{1220.58 \text{ Kg C}}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

DETERMINACION DEL HIDROGENO TOTAL

$$\frac{98.3 \text{ Kg mol CH}_4}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{4 \text{ Kg H}_2}{\text{Kg mol CH}_4} = \frac{393.2 \text{ Kg H}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\frac{0.96 \text{ Kg mol C}_2\text{H}_6}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{6 \text{ Kg H}_2}{\text{Kg mol C}_2\text{H}_6} = \frac{5.76 \text{ Kg H}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\frac{0.3025 \text{ Kg mol C}_3\text{H}_8}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{8 \text{ Kg H}_2}{\text{Kg mol C}_3\text{H}_8} = \frac{2.42 \text{ Kg H}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\frac{0.08 \text{ Kg mol n-C}_4\text{H}_{10}}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{10 \text{ Kg H}_2}{\text{Kg mol C}_4\text{H}_{10}} = \frac{0.8 \text{ Kg H}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\frac{0.025 \text{ Kg mol i-C}_4\text{H}_{10}}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{10 \text{ Kg H}_2}{\text{Kg mol C}_4\text{H}_{10}} = \frac{0.25 \text{ Kg H}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\frac{0.02 \text{ Kg mol n-C}_5\text{H}_{12}}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{12 \text{ Kg H}_2}{\text{Kg mol C}_5\text{H}_{12}} = \frac{0.24 \text{ Kg H}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\frac{0.01 \text{ Kg mol i-C}_5\text{H}_{12}}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{12 \text{ Kg H}_2}{\text{Kg mol C}_5\text{H}_{12}} = \frac{0.12 \text{ Kg H}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

$$\text{Hidrógeno total} = \frac{402.79 \text{ Kg H}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

DETERMINACION DEL OXIGENO TOTAL:

$$\frac{0.0175 \text{ Kg mol CO}_2}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{32 \text{ Kg O}_2}{\text{Kg mol CO}_2} = \frac{0.56 \text{ Kg O}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

DETERMINACION DEL NITROGENO TOTAL:

$$\frac{0.285 \text{ Kg mol N}_2}{100 \text{ Kg mol GN}} \times \frac{28 \text{ Kg N}_2}{\text{Kg mol N}_2} = \frac{7.98 \text{ Kg N}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}$$

EN TERMINOS PORCENTUALES:

$$C = \frac{\frac{1220.58 \text{ Kg C}}{100 \text{ Kg mol GN}}}{\frac{1631.91 \text{ Kg GN}}{100 \text{ Kg mol GN}}} = 0.74795 \quad 74.8 \%$$

$$H_2 = \frac{\frac{402.79 \text{ Kg H}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}}{\frac{1631.91 \text{ Kg GN}}{100 \text{ Kg mol GN}}} = 0.24682 \quad 24.68 \%$$

$$O_2 = \frac{\frac{0.56 \text{ Kg O}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}}{\frac{1631.91 \text{ Kg GN}}{100 \text{ Kg mol GN}}} = 0.00034 \quad 0.034 \%$$

$$N_2 = \frac{\frac{7.98 \text{ Kg N}_2}{100 \text{ Kg mol GN}}}{\frac{1631.91 \text{ Kg GN}}{100 \text{ Kg mol GN}}} = 0.00489 \quad 0.49 \%$$

Por tanto:

COMPOSICION GRAVIMETRICA DEL GAS NATURAL, expresado en términos de:

% ; Kg elemento/Kg Gas natural.

$$C = 74.8\%$$

$$H_2 = 24.68\%$$

$$O_2 = 0.034\%$$

$$N_2 = 0.49 \%$$

los datos para realizar estos cálculos son tomados de la tabla B.1.

## GAS NATURAL

## AIRE TEORICO NECESARIO PARA UNA COMBUSTION PERFECTA

COMPOSICION VOLUMETRICA	PESO MOLECULAR	PESO MOLEC. 100 MOLES	%	DECIMAL	$\frac{O_2}{\text{AIRE}}$	REQUERIMIENTO PARA COMBUSTION PERFECTA Kg/Kg COMBUSTIBLE	
						$O_2$	AIRE SECO
$CH_4$ : 98.3	x 16	= 1572.8	0.9638	x 3.99 =	3.8456		
				x 17.27			= 16.64
$C_2H_6$ : 0.96	x 30	= 28.8	0.0176	x 3.73 =	0.0656		
				x 16.12			= 0.2837
$C_3H_8$ : 0.3025	x 44	= 13.31	0.0082	x 3.63 =	0.0298		
				x 15.70			= 0.1287
n- $C_4H_{10}$ : 0.08	x 58	= 1.45	0.00089	x 3.58 =	0.0032		
				x 15.49			= 0.0138
n- $C_5H_{12}$ : 0.020	x 72	= 1.44	0.00088	x 3.55 =	0.00312		
				x 15.35			= 0.0135
i- $C_5H_{12}$ : 0.0175	x 44	= 0.77					
$N_2$ :	0.285 x 28	= 7.98					
		1631.91	1.0000		3.9589		17.1347

Aire teórico para  
combustión perfecta

$$= 17.13 \frac{\text{Kg AIRE}}{\text{Kg combustible}}$$

PRODUCTOS DE COMBUSTION

		CO <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> O		N <sub>2</sub>
CH <sub>4</sub> :	0.9638	x 2.74 = 2.64	x	2.25 = 2.17	x	13.28 = 12.8
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> :	0.0176	x 2.93 = 0.052	x	1.8 = 0.03	x	12.39 = 0.22
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> :	0.0082	x 2.99 = 0.025	x	1.63 = 0.013	x	12.07 = 0.10
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> :	0.0028	x 3.03 = 0.0085	x	1.55 = 0.0043	x	11.91 = 0.03
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> :	0.00059	x 3.03 = 0.0027	x	1.55 = 0.0014	x	11.91 = 0.01
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> :	0.00088	x 3.05 = 0.0027	x	1.50 = 0.0013	x	11.81 = 0.01
i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> :	0.00044	x 3.05 = 0.0013	x	1.50 = 0.0007	x	11.81 = 0.0052
		2.7321		2.2207		13.18

CO<sub>2</sub>: 2.73

H<sub>2</sub>O: 2.22

N<sub>2</sub> : 13.18

18.13 Kg humos húmedos  
Kg gas natural

15.91 Kg Humos secos  
Kg Gas natural

En igual forma que para el combustible anterior los valores para realizar los cálculos con los datos del combustible, son tomados de la tabla B.2, como también servirá para los cálculos posteriores.

CALCULOS MOLARES CON EL GAS NATURAL

COMPOSICION GRAVIMETRICA	MOLES 100 Kg GN	REQUERIMIENTO PARA LA COMBUSTION MOLES/100Kg	
		O <sub>2</sub>	AIRE SECO
C = 74.8	÷ 12 = 6.23	x 1 = 6.23	x 4.76 = 29.65
H <sub>2</sub> = 24.68	÷ 2 = 12.34	x 0.5 = 6.17	x 2.38 = 29.37
O <sub>2</sub> = 0.034	÷ 32 = 0.00106		
N <sub>2</sub> = 0.49	÷ 28 = 0.0175		
			12.4      59.02

$$\text{Aire Molar teórico para combustión perfecta} = 59.02 \frac{\text{Mol Aire}}{\text{Mol Gas Natural}}$$

PRODUCTOS DE COMBUSTION

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &: 6.23 \times 1 &= 6.23 \\ \text{H}_2\text{O} &: 12.34 \times 1 + 1.24^* &= 13.58 \\ \text{SO}_2 &: &= \\ \text{N}_2 &: 59.02 \times 0.79 &= 46.63 \\ \text{Moles H}_2\text{O en aire} & &= 66.44 \frac{\text{Moles Humo Húmedo}}{\text{Mol Combustible}} \\ * & \frac{59.02 \times 29 \times 0.013}{18} = 1.24 &= 52.86 \frac{\text{Moles Humo Seco}}{\text{Mol Combustible}} \end{aligned}$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{13.58}{16.44} \times 100 = 20.44\% \quad \text{presión parcial} = 3 \text{ psia.}$$

$$T_{\text{punto rocío}} = 60.82^\circ\text{C}$$

Los datos son tomados de la tabla B.2

## GAS NATURAL

AIRE TEORICO MOLAR PARA UNA COMBUSTION PERFECTA, PRODUCTOS DE  
COMBUSTION Y PUNTO DE ROCIO

Moles/100 mol Combust.

Moles  
100 Moles GN

ANALISIS (%) VOLUMETRICO			O <sub>2</sub>	AIRE SECO
CH <sub>4</sub> :	98.3	x 2 =	196.6	
			x 9.53 =	936.8
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> :	0.96	x 3.5 =	3.36	
			x 16.68 =	16
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> :	0.3025	x 5 =	1.51	
			x 23.82 =	7.21
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> :	0.08	x 6.5 =	0.52	
			x 30.97 =	2.48
i :	0.025	x 6.5 =	0.16	
			x 30.97 =	0.77
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> :	0.020	x 8 =	0.16	
			x 38.11 =	0.76
i - :	0.010	x 8 =	0.08	
			x 38.11 =	0.38
CO <sub>2</sub> :	0.0175			
N <sub>2</sub> :	0.285			
	100.00		202.4	964.41

$$\text{Aire teórico Molar para combustión perfecta} = 9.64 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{m}^3 \text{ gas natural}} \frac{\text{Kg mol aire}}{\text{Kg mol combust.}}$$

Los Kg moles de H<sub>2</sub>O en el aire son:

$$\frac{964.41 \times 29 \times 0.013}{18} = 20.2$$

$$\text{Moles agua} = 20.2 \frac{\text{Kg moles H}_2\text{O}}{\text{Kg mol Gas Natural}}$$

PRODUCTOS DE COMBUSTION

		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
CH <sub>4</sub> :	98.3	x 1 = 98.3	x 2 = 196.6	x 1.53 = 740.2
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> :	0.96	x 2 = 1.92	x 3 = 2.88	x 13.18 = 12.65
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> :	0.3025	x 3 = 0.91	x 4 = 1.21	x 18.82 = 5.69
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> :	0.08	x 4 = 0.32	x 5 = 0.40	x 24.47 = 1.96
i - :	0.025	x 4 = 0.10	x 5 = 0.13	x 24.47 = 0.61
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> :	0.02	x 5 = 0.10	x 6 = 0.12	x 30.11 = 0.6
i - :	0.01	x 5 = 0.05	x 6 = 0.06	x 30.11 = 0.3
CO <sub>2</sub> :	0.0175			
N <sub>2</sub> :	0.285			
		161.62	201.4	762

$$\text{CO}_2 = 101.62$$

$$\text{H}_2\text{O} = 201.4$$

$$\text{N}_2 = 762.02$$

1065.03 Kg moles Humos Húmedos

100 Kg moles Gas Natural

863.63 Kg moles Humos Secos

100 Kg moles Gas Natural

Los datos son tomados de la tabla B.2

PODER CALORIFICO

	REACCION DE COMBUSTION	INFERIOR		SUPERIOR	
		m <sup>3</sup>	Kcal	m <sup>3</sup>	Kcal
CH <sub>4</sub> :	98.3 % CH <sub>4</sub> + 2O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	0.983 x 8110 =	7972.13	0.983 x 9005 =	8851.92
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> :	0.96 % C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> + 3.5O <sub>2</sub> → 2CO <sub>2</sub> + 3H <sub>2</sub> O	0.0096x14420.46=	138.44	0.0096x15765.7=	151.35
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> :	0.3025% C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> + 5O <sub>2</sub> → 3CO <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> O	.003025x20642.7 =	62.44	.003025x22436.7=	67.87
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> :	0.0800% C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> +6.5O <sub>2</sub> → 4CO <sub>2</sub> + 5H <sub>2</sub> O	.0008 x 26834 =	21.47	.0008 x 29076 =	23.26
i - :	0.0250% C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> +6.5O <sub>2</sub> → 4CO <sub>2</sub> + 5H <sub>2</sub> O	.00025x 26750 =	6.69	.00025x 28991.8=	7.25
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> :	0.0200% C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> +8O <sub>2</sub> → 5CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O	.0002 x 33045.5=	6.61	.0002 x 35734.7=	7.15
i - :	0.0100% C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> +8O <sub>2</sub> → 5CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O	.0001 x 32964.21 =	3.3	.0001 x 35655.2=	3.57
CO <sub>2</sub> :	0.01750%				
N <sub>2</sub> :	0.2850 %				
TOTAL:	100 %		8211.08		9112.37

$$PCI = 8211.08 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^3}$$

$$PCS = 9112.37 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^3}$$

Los datos son tomados de la tabla B.2

CALCULO TEORICO DE LA DENSIDAD DE LOS GASES COMBUSTIONADOS

	Kg/Kg gas natural	%	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
CO <sub>2</sub> :	2.7321	0.15	1.8741
H <sub>2</sub> O :	2.2213	0.1224	0.76213
N <sub>2</sub> :	13.1800	0.727	1.19157

$$\rho = 1.24 \text{ Kg/m}^3$$

CALCULO TEORICO DE LA DENSIDAD DE LA MEZCLA (Combustible + Comburente)  
AL COMBUSTIONARSE

COMPOSICION GRAVIMETRICA Kg, Kg Gas Natural		%	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )
C : 74.8	CO <sub>2</sub> : 6.23	0.0956	1.8741
O <sub>2</sub> : 0.034			
H <sub>2</sub> : 24.68	H <sub>2</sub> O : 12.34	0.1893	0.76213
N <sub>2</sub> : 0.49	N <sub>2</sub> : 46.63	0.72	1.19157

$$\rho = 1.18 \text{ Kg/m}^3$$

CALCULO TEORICO DE LA TEMPERATURA DE COMBUSTION

$$T = \frac{PCI}{(n C_p)}$$

(n Cp): masa de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y N<sub>2</sub> multiplicada por sus respectivos colores específicos.

Para realizar estos cálculos se toman datos de la Tabla B.1 y B.3.

Kg/Kg	GAS NATURAL	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )	MASA (Kg)	CALOR ESPECIFICO (Kcal/Kg °C)
CO <sub>2</sub>	2.7321	1.8741	1.4578	0.1989
N <sub>2</sub>	13.18	1.19157	11.0610	0.2485
H <sub>2</sub> O	2.2213	0.76213	2.9146	0.4460

$$T = \frac{8211 \text{ Kcal/m}^3 \times \text{m}^3 / 1.24 \text{ Kg}}{(1.4578 \times 0.1989) + (11.0610 \times 0.2485) + (2.9146 \times 0.446) \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}}$$

$$T = 1526,29^\circ\text{C} \quad 1529.28$$

En la misma forma que para el combustible anterior se calcula el volumen de humos secos:

$$\frac{2.7321}{1.8741} + \frac{13.18}{1.19157} = 12.5188 \text{ m}^3$$

También el porcentaje de CO<sub>2</sub> presente en los humos secos:

## CALOR ESPECIFICO DEL GAS NATURAL

	COMPOSICION VOLUMETRICA V	PESO MOLECULAR M	VM	$\frac{VM}{VM}$	$C_p$	$\frac{VM}{VM} \times C_p$
CH <sub>4</sub> :	0.983	16	15.73	0.9639	.526	0.507
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> :	0.0096	30	0.29	0.0178	.409	.0073
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> :	.003025	44	.13	.008	.388	.0031
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> :	.0008	58.12	.047	.0029	.387	.0011
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> :	.0002	58.12	.015	.0009	.397	.00036
i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> :	.0002	72	.014	.00086	.388	.00033
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> :	.0001	72	.007	.00043	.3974	.00017
CO <sub>2</sub> :	.000175	44	.0077	.00047	.1989	.00009
N <sub>2</sub> :	.00285	28	.0798	.00489	.248	.0012
						$C_p = 0.52065$

$$C_p = 0.52 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{K}$$

Calor específico del  
gas natural

$$\text{GRAVEDAD ESPECIFICA} = \frac{\text{PESO MOLECULAR}}{\text{PESO AIRE}} = \frac{16.3197}{28.95} = 0.5637$$

$$R = 1.9859 \text{ Kcal/K mol}^\circ\text{K}$$

$$R(\text{Gas Natural}) = 0.1217 \text{ Kcal/Kg }^\circ\text{K} = 51.95 \frac{\text{Kg m}}{\text{Kg }^\circ\text{K}}$$

$$C_v = C_p - R = 0.52 - 0.1217 \quad C_v = 0.4 \text{ Kcal K}^\circ\text{K}$$

$$K = \frac{C_p}{C_v} \quad K = 1.30$$

Los datos para realizar estos cálculos han sido tomados de las tablas B.1 y B.2.

CALOR ESPECIFICO DE LOS GASES DE ESCAPE DEL GAS NATURAL

COMPOSICION Kg/Kg Gas Natural	%	C <sub>p</sub>	FRACCION C <sub>p</sub>
CO <sub>2</sub> : 2.7321	0.1507	0.1989	0.0300
H <sub>2</sub> O : 2.2213	0.1225	0.446	0.0546
N <sub>2</sub> : 13.1800	0.7268	0.2485	0.1806
			0.2652

$$C_p \text{ g} = 0.2652 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$$

2.3.9. Resumen comparativo de cálculos teóricos

TABLA 2.11

COMPOSICION GRAVIMETRICA (Kg/Kg combustible)

COMBUSTIBLE	BUNKER	GAS NATURAL
Composición gravi métrica % Kg/Kg combustible		
C	86.06	74.8
H <sub>2</sub>	11.57	24.68
O <sub>2</sub>	0.43	0.034
S <sub>2</sub>	1.21	-----
N <sub>2</sub>	----	0.49
Ceniza	0.03	-----

TABLA 2.12

## CALCULOS TEORICOS DE COMBUSTION

COMBUSTIBLES		BUNKER	GAS NATURAL
Aire teórico para una combustión perfecta	Kg/Kg combustible	14.00	17.13
	mol/mol combustible	48.28	59.22
Temperatura teórica de combustión (°C)		2 468.45	1.526.29
% CO <sub>2</sub> teórico en gases de combustión		15.80	11.65
Temperatura de punto de rocío (°C)		51.30	60.82
Cantidad teórica de humos secos	Kg/Kg combustible	13.98	15.91
	mol/mol combustible	45.40	52.86
Cantidad teórica de humos con humedad	Kg/Kg combustible	15.01	18.13
	mol/mol combustible	52.20	66.44
Poder calorífico Kcal/#	Inferior	10.321,22 Kcal/Kg	8.211.08 Kcal/m <sup>3</sup>
	Superior	10.984,76 "	9.112,37 "
Calor específico del combustible a p. const (Kcal/Kg °C)		0.5753	0.5207
Calor específico de los gases de combustión (p=c) (Kcal/Kg°C)		0.2515	0.2652
$\frac{C_p}{C_v} = K$		---	1.31
Densidad teórica del combustible al combustionarse con O <sub>2</sub>		1.24	1.18 Kg/m <sup>3</sup>
Densidad teórica de los gases de combustión		1.30	1.24 Kg/m <sup>3</sup>
Cantidad gramos de agua por metro cúbico de humos		124.27	206.40

### 2.3.10. Aspectos Físicos de la Combustión

El estudio de los fenómenos ligados a la combustión se realizan en campos que pertenecen tanto a la química como a la física; en las manifestaciones a niveles térmicos poco elevados del tipo de las llamas frías, en las condiciones límite de autoiniciación y, por consiguiente, de autopropagación, en las llamas al vacío, etc., los procesos químicos toman la delantera, mientras que en las condiciones de llama estable (altas temperaturas y presiones - por encima de las atmosféricas) son los factores físicos los que asumen un papel más importante.

Para individualizar la forma y la estructura de la llama, sus dimensiones, el grado de emisividad y, por consiguiente, el mecanismo de liberación del calor en las condiciones de llama estable, es necesario conocer además de la cinética de las reacciones de oxidación, la aerodinámica del sistema, la geometría del local, el grado de turbulencia de los fluidos, el estado de dispersión del combustible, la homogeneidad de la mezcla en reacción y otros parámetros de carácter puramente físico.

Un combustible puede reaccionar con el comburente

según tres diversos regímenes: en el primero, de oxidación lenta, se alcanza (a causa de particulares condiciones ambientales) una temperatura limitada, a la cual la reacción oxidante y el proceso de liberación del calor tienen lugar con bajas velocidades específicas, y a veces sin manifestaciones visibles (llamas); en el segundo, una mezcla combustible/comburente de determinada composición es inducida a reaccionar por medio de una fuente localizada de calor, obteniendo una "onda de deflagración", o bien en fuente de llama; el tercero se refiere a las denominadas ondas de determinación, que pueden obtenerse directamente, o bien, si las condiciones ambientales lo permiten, por transición de una onda precedente de deflagración. El régimen más interesante, desde el punto de vista práctico, es, sin duda, el de las ondas de deflagración (llamas subsónicas); éstas constituyen en efecto, el sistema más simple y eficiente para convertir la energía química de un combustible en calor sensible.

Estas ondas que propagan a velocidades bien definidas, características del tipo de mezcla química y de otros parámetros relacionados con las condiciones

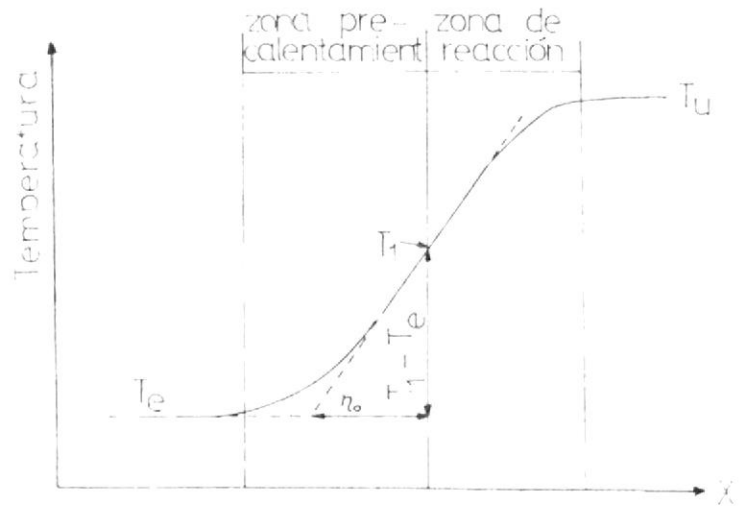


Fig. 2.7. Evolución de la temperatura en un frente de llama (zona de deflagración).

físicas y con el local, están constituidas por una sutil zona de reacción (espesor desde 0.1 mm. hasta una decena de mm) dentro de la cual tiene lugar la transformación química y la liberación del calor; la zona en reacción divide al material en reactivado y no reactivado. La velocidad del frente de llama es del orden de algunos metros por segundo, y la producción específica de calor es bastante elevada. La fig. 2.7 obtenida por Lewis, muestra la evolución de la temperatura en un frente de llama generado por la combustión de gases premezclados.

El gas que entra en la zona de reacción de la iz-

quiera, a la temperatura  $T_e$ , se ve obligado a precalentarse por conducción, a causa del gradiente de temperatura  $T$ , (temperatura de ignición)  $T_i$  inicia la transformación exotérmica, que continúa - en la zona de reacción y más escarpado el gradiente de temperatura en el punto de inflexión. La tangente a ésta, prolongada hasta encontrar - la línea paralela a las abscisas con ordenada  $T_e$ , define el espesor característico de la onda  $\eta_0$ ; este valor es función de las dimensiones de la zona de precalentamiento, y puede obtenerse de la siguiente relación, aplicable al punto de inflexión del gradiente:

$$C_p \rho_i v_F (T_i - T_e) = K (dT/dx) = K (T_i - T_e) / \eta_0$$

donde:

$C_p$  : calor específico de la mezcla gaseosa

$\rho_i$  : densidad de la mezcla no quemada todavía

$v_F$  : velocidad de combustión (con dirección normal a llama)

$K$  : coeficiente de conducción del calor.

Despejando  $\eta_0$  se obtiene:

$$\eta_0 = \frac{K}{C_p \rho_i v_F}$$

por tanto,  $\tau_{10}$  es función de las propiedades de la mezcla, de su densidad, y de su velocidad de llama.

#### EFFECTOS DE LA TURBULENCIA SOBRE LA LLAMA Y SOBRE LOS FENOMENOS DE IGNICION Y EXTINCION

De los diversos procesos físicos que intervienen en la combustión, la turbulencia es, con mucho, el más importante. Corresponde a un movimiento de sordenado de los fluídos, con formación de un gran número de torbellinos que interfieren unos con otros, dispersos en todo el medio en reacción, de volumen y características cinéticas muy diversas entre sí. En un movimiento turbulento los fluídos se mueven juntos dentro de un torbellino, varían continuamente de volumen y de masa en el tiempo.

La turbulencia puede producir efectos cuantitativos de difusión y de mezcla más marcados que los movimientos moleculares; y ésto a causa del diverso efecto de las distancias de mezcla, es decir, las distancias medias que los fluídos separados en un movimiento vertiginoso simultáneo, de

ben recorrer antes de llegar a su mezcla total, de ellas depende los "tiempos de mezcla".

Los movimientos turbulentos ejercen una acción determinante sobre la combustión, ya que los flujos en agitación desordenada transportan porciones de llama, encrespando y ondulando la superficie: de este modo la superficie del frente de llama sufre una gran ampliación, y se obtienen un aumento neto de la velocidad de liberación del calor. El movimiento turbulento provoca además un avance más rápido de la onda en dirección de la mezcla inflamable que no ha reaccionado aún; esta particularidad se aprovecha a fondo en las aplicaciones industriales; ya que permite obtener producciones de calor más intensivas y localizadas (quemadores). Las propias llamas turbulentas son generadoras de fuerte turbulencia, produciéndose la expansión instantánea de los gases provocada por combustión; estos efectos favorecen y aceleran el proceso y constituyen un auxilio práctico no despreciable.

La distancia entre dos puntos limítrofes, en un medio caracterizado por alta vertiginosidad, tiende a aumentar con el tiempo, por efecto de la ac

ción difusora de la turbulencia. El aumento indiscriminado de la turbulencia puede producir efectos negativos y llevar a disminuciones de rendimiento térmico, y aún, en el caso extremo, a la extinción de la llama.

### COMPORTAMIENTO DE LAS LLAMAS PREMEZCLADAS

El principio esencial en que se basa un quemador (por ejemplo: tipo Bunker) es el de la mezcla del gas con aire, obtenida aprovechando la presión del gas, en un punto que precede a la zona donde se produce la llama. El gas sale por una tobera situada en la parte baja del tubo del quemador, en la proximidad de las aberturas creadas en el cuerpo de este último con el fin de permitir la entrada del aire (aire primario); por efecto del

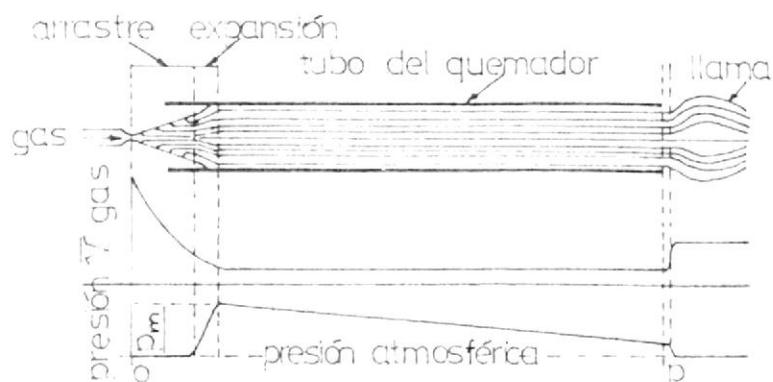


Fig.2.8.- Esquema del funcionamiento de un quemador cilíndrico tipo Bunsen.-

chorro de gas se crea en la zona una depresión, que favorece la aspiración del aire y la sucesiva mezcla de éste con el gas en el tubo superior. La mezcla que recorre el tubo debe tener una velocidad suficiente para impedir que la llama que se forma, después de la ignición, en la extremidad libre penetre en el interior del quemador. En la combustión completa del gas participa también el aire secundario que rodea la llama. La figura 2.7 representa el funcionamiento de un quemador bunker y la evolución de la presión y de la velocidad de la mezcla dentro y a la salida del tubo.

Como la velocidad de la mezcla gaseosa en el borde del quemador es igual a cero, la llama se une a éste, tomando la forma de un cono con el vértice en el eje del tubo: la componente de la velocidad del gas normal a la superficie de la llama corresponde a la velocidad de ésta.

#### 2.4. CALCULO DE GENERACION DE CALOR

Usando los datos proporcionados en el punto 2.1:

$$\dot{m}_C = 17,800 \text{ Kg/hr} \quad (\text{Bunker C})$$

$$\dot{m}_V = 283,000 \text{ Kg/hr} \quad (\text{Vapor})$$

En las masas de bunker C y Vapor que la unidad consume y genera respectivamente, para generar una potencia máxima de 73 MW. Hay también disponibles datos para otras cargas.

Para hallar la cantidad de Gas Natural que se consumiría para producir una generación de vapor dada, se hace lo siguiente:

$$\dot{m}_{\text{C Bunker}} \text{ PCI}_{\text{Bunker}} = \dot{m}_{\text{C Gas Natural}} \text{ PCI}_{\text{Gas Natural}}$$

$$\dot{m}_{\text{C Gas Natural}} = 17,800 \text{ Kg/hr} \frac{10321.22 \text{ Kcal/Kg}}{8211 \text{ Kcal/m}^3}$$

$$\dot{m}_{\text{C Gas Natural}} = 22,374,58 \text{ m}^3/\text{hr}$$

TABLA 2.13  
 VALORES DE COMBUSTIBLE PARA DIFERENTES  
 GENERACIONES DE CALOR

GENERADOR (MW)	FLUJO VAPOR PRINCIPAL (Kg/hr)	FLUJO (Kg/hr) BUNKER C	FLUJO GAS NATURAL (m <sup>3</sup> /hr)
73	285000	17800	22375
55	209000	14000	17598
36	140000	9400	11816
18	72000	5300	6662

PRODUCCION DE LA CALDERA (Mcal/hr)

$$P.C. = \frac{\dot{m}_V (h_1 - h_2)}{1000}$$

$$\dot{m}_V = 285000 \text{ Kg/hr (Vapor)}$$

$$h_1 = 815 \text{ Kcal/Kg}$$

$$h_2 = 168.2 \text{ Kcal/Kg}$$

$$P.C. = \frac{285000 \text{ Kg/hr} (815 - 168.2) \text{ Kcal/Kg}}{1000}$$

$$P.C. = 184.338 \text{ Mcal/hr}$$

Caballos de caldera (Kcal/hr)

$$C.C. = \dot{m}_V (h_1 - h_2)$$

$$8441.6$$

$$\text{C.C.} = \frac{285000 \text{ Kg/hr} (815 - 168.2) \text{ Kcal/Kg}}{8441.6}$$

$$\text{C.C.} = 21.836,86 \text{ Kcal/hr}$$

## CAPITULO III

### SISTEMA ACTUAL DE COMBUSTION

#### 3.1. DESCRIPCION DEL EQUIPO: CALDERA Y EQUIPOS ADICIONALES

La caldera es el elemento esencial en una planta de vapor porque el vapor no se puede obtener a menos que se genere en la caldera, ésto si no se tiene a mano una fuente de vapor subterránea, como lo existen en ciertos lugares (por ejemplo: Italia); la mayor parte de las plantas generan su propio vapor en recipientes herméticos alimentados con agua que al recibir calor, generan vapor. El vapor generalmente se genera bajo presión, de acuerdo con las características de la máquina que alimenta. A mayores presiones y temperaturas, mayor será la eficiencia de la máquina que transformará el valor del vapor en energía mecánica.

Un grupo productor de vapor de agua es una combinación de aparatos, que puede constar de cualquiera o todos los siguientes: caldera, hogar, equipo de quemadores o el necesario para quemar el combustible, cámaras de agua, purificador del vapor, recalentador, atemperador (dispositivo para controlar la temperatura del vapor), economizador y calentadores de aire ya sea a vapor o aprovechando

el calor de los gases de escape.

A continuación se observa algunos valores de diseño de la caldera:

#### CARACTERISTICAS DE DISEÑO

TIPO	Mitsubishi-CE 2 Domos, Caldera Tubos de agua (interperie con protección para lluvia).
Evaporación Máxima continua.	295.000 Kg/hr
Presión vapor (de diseño)	105 Kg/cm <sup>2</sup> g
Salida supercalen- tador a máxima car- ga.	91 Kg/cm <sup>2</sup> g
Temperat. agua ali- mentación (entrada a caldera)	222°C
Temperatura vapor (salida supercalen- tador)	513°C
Temperat. aire am- biente.	24.7°C

Entrada precalentador aire.	100°C
Salida precalentador aire.	336°C
Sistema de tiro	Forzado
Sistema de combustión	Bunker ó Gas Natural
Superficie de calefacción	3775 m <sup>2</sup>
Presión D.M.P.	97.2 Kg/cm <sup>2</sup>

#### BOMBA AGUA ALIMENTACION DE CALDERA

TIPO	CENTRIFUGA
Número bombas	2
Capacidad	340 T/H
Columna total	106 Kg/cm <sup>2</sup> g
Presión succión	5.5 Kg/cm <sup>2</sup> σ
Temperatura agua	154°C

#### MOTOR:

Capacidad	1470 Kw
RPM	3600
Sistema impulsor	Conectado directo.

#### 3.1.1. Hogar: Banco de Tubos, Domos, refractarios

Hogar es el recinto en donde se quema el combustible. Al momento, el hogar integral enfriado por

agua es aplicado prácticamente de acuerdo a cada tipo y tamaño de caldera. Es relativamente simple para el operador de caldera establecer la particularidad de cada instalación.

Los quemadores, se colocan en una o más filas horizontales, estando la hilera inferior cercana al fondo para obtener más longitud de flama, no se colocan cerca de las paredes laterales, para evitar una intensa erosión en los refractarios.

#### CAPACIDADES DEL HOGAR

TIPO	Paredes de agua con aletas sólidas
Volumen total	795 m <sup>3</sup>
Superficie calefacción efectiva.	
Superficie radiación	654 m <sup>2</sup>
Superficie convección	321 m <sup>2</sup>
Superficie total	975 m <sup>2</sup>
Dimensiones	
Frente	8568 mm.
Fondo	9468 mm.
Altura	12190 mm.
Cabezales	

Pared agua	Material	Diámetro	Espaciamiento
Frente	SA178-C	76.2 D.E.	102
Lateral	SA178-C	76.2 D.E.	102
Posterior	SA178-C	76.2 D.E.	102
Techo	SA178-C	76.2 D.E.	102

#### BANCO DE TUBOS Y REFRACTARIOS

La forma en que están unidas las paredes de la caldera la podemos ver en la fig. 3.1. Las paredes del hogar están construídas de tubos de 76.2 mm. de diámetro exterior sobre centro de 102 mm. Los espacios entre tubos están cerrados por aletas de 25.4 mm. los cuales están soldados a los tubos de tal manera de formar un sello completo de la mezcla gaseosa: combustible + comburente o gases de combustión. Con excepción de las paredes laterales del caldero, todas las paredes son armadas en fábrica y soldadas luego en el lugar deseado. fig. 3.2.

Las paredes laterales de la caldera consisten de tubos prealeteados los cuales son soldados juntos durante el montaje, para mantener la hermeticidad del hogar.

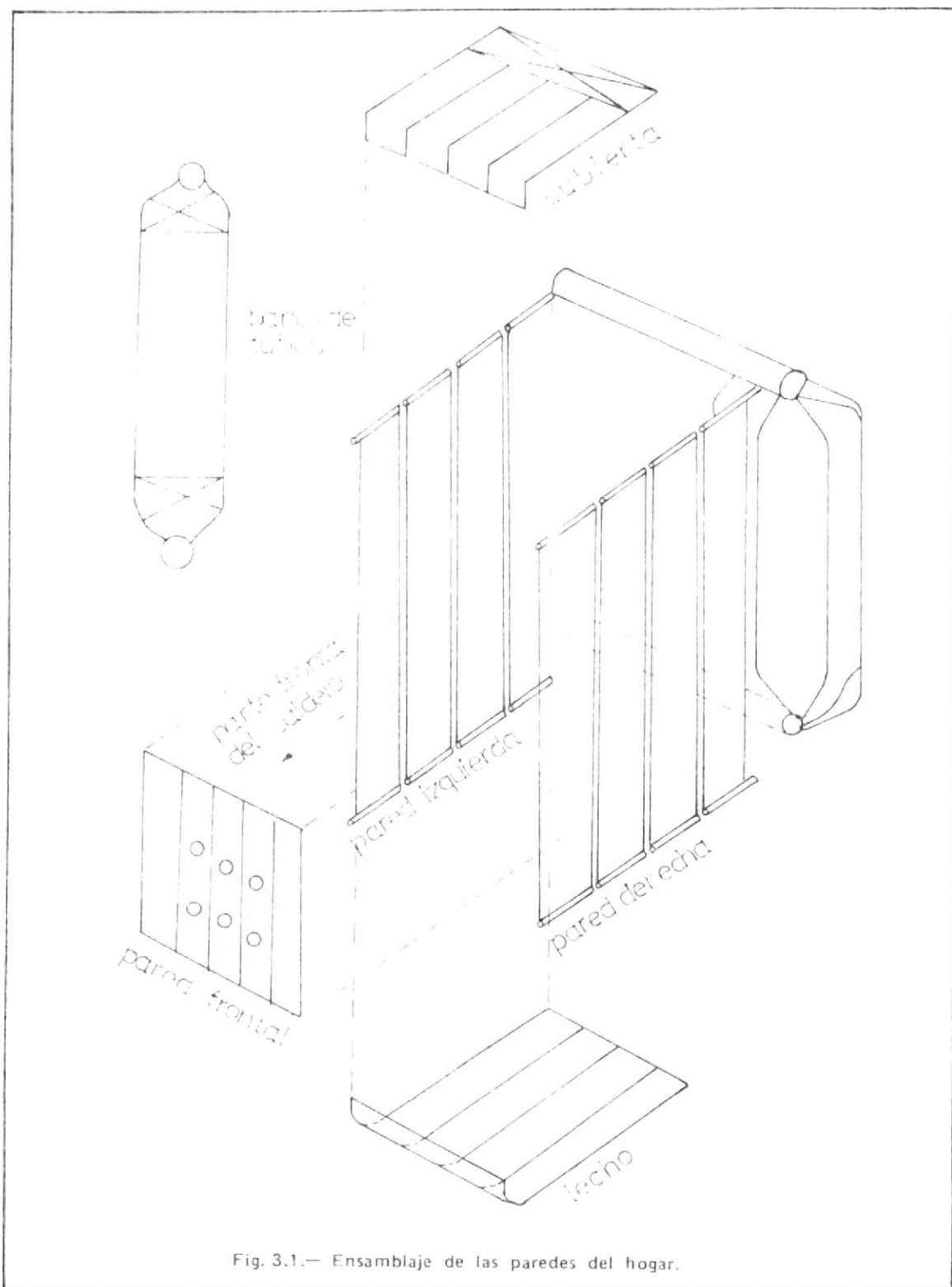


Fig. 3.1.— Ensamblaje de las paredes del hogar.

Los extremos de los tubos son emparejados dentro de los domos, las conexiones de los colectores - soldados. Concreto refractario se usa también con el propósito de producir sellos, es aplicado entre 2 líneas de tubos en el techo de la caldera, y en los desviadores de gases.

El fondo del hogar de esta caldera es del tipo de fondo plano. Los tubos del piso son cubiertos con ladrillo refractario, los cuales son libremente colocados sobre la parte superior de los tubos con suficiente espacio entre filas para permitir suficiente expansión. Este tipo de construcción de fondo es usado para hogares en los cuales la formación de cenizas es despreciable, o sea no hay necesidad de un tanque de escoria o tolva para cenizas, como es el caso de hogares que usan carbón como combustible.

El acabado exterior de la caldera consiste de carcazas acanaladas; el espacio entre carcaza y paredes de tubos es relleno por aislamiento de lana mineral. Los bloques o ladrillos refractarios son sostenidos a las paredes por medio de alambres.

Cerca del 80% del calor absorbido por el agua ex

puesto a las temperaturas del hogar está acompañado por radiación.

En la parte superior del hogar la razón de absorción de calor puede ser un promedio de un 70%, - pero cerca al fondo puede ser una y media veces el promedio.

Las paredes de agua fría son trabajadas para altas velocidades de absorción de calor más que la superficie de calentamiento promedio en la sección de convección. Por lo tanto, ellas pueden - quedarse bajo este tipo de servicio, la formación de depósitos en los tubos debe ser mantenido en un mínimo y el agua de alimentación debe ser tratada químicamente. Cada planta en forma individual tiene problemas con el agua de alimentación por la naturaleza que esta agua es obtenida, por tanto, cada planta debe resolver este problema - para asegurar la vida de los tubos del hogar con una buena agua de alimentación.

DIAMETRO TUBOS CALDERA (mm):	MATERIAL
76.2	SA178-C
63.5	SA178-C

## CIRCULACION DE AGUA-VAPOR EN LA CALDERA

Con el fin de producir una evaporación más rápida, tener una mejor economía entre otros factores, se eleva la temperatura del agua de alimentación al pasar por los calentadores de agua. Para introducir el agua al domo, su presión es elevada por las bombas de alimentación en un 10% más que la presión interior del domo y entra a éste por la tubería principal de alimentación, localizada por la parte posterior de la caldera.

En el interior del domo, el agua se distribuye a lo largo de éste, por medio de un tubo con barrenos que dirigen el chorro hacia la parte inferior. Esta agua que alimenta la caldera se une a la que se encuentra en el domo y que se halla separada del vapor. La fig. 3.2 muestra la forma en que circula el agua en la caldera debido a que la pared está en contacto con los gases de combustión, la circulación de agua es por diferencia de densidades, por esta razón, a estas calderas se las conoce como de "Circulación Natural", por efectuarse el movimiento en forma rápida como vemos en la fig. 3.2, el agua baja al domo inferior y se distribuye a los cabezales inferiores, luego aquí el

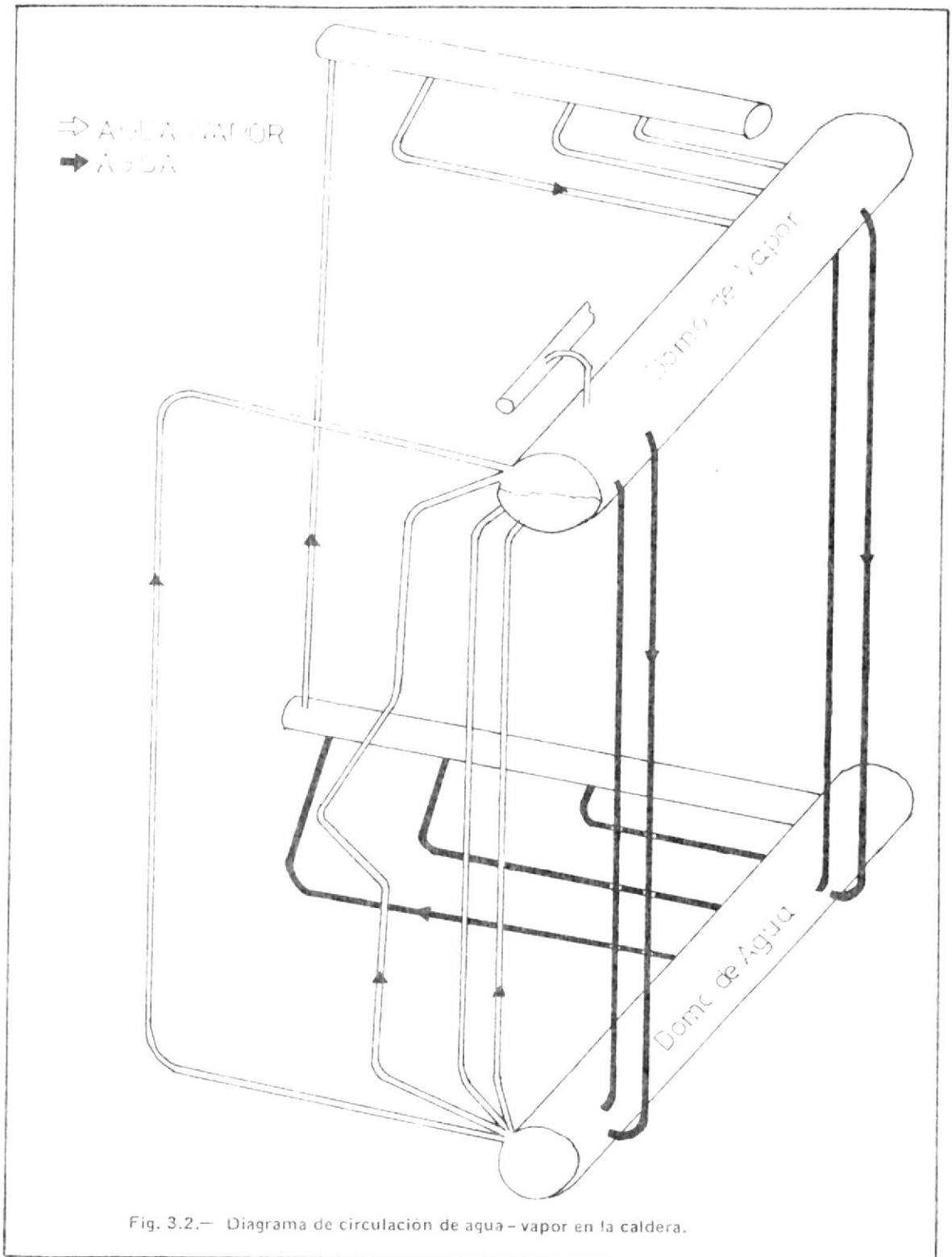


Fig. 3.2.— Diagrama de circulación de agua - vapor en la caldera.

agua recibe calor por radiación y convección de los gases de combustión, de esta manera el vapor saturado llega al domo de vapor. Los domos de agua y vapor están conectados con los siguientes circuitos.

a) Domo de agua - piso del hogar - pared frontal-techo - domo de vapor.

b) Domo de agua - tubos de suministro - cóncavas de agua inferiores de paredes laterales.

Domo de agua - paredes posteriores del hogar - arco de deflexión.

Mampara entre supercalentador secundario, domo de vapor y banco de tubos de caldera. Dentro del domo existe un separador de vapor. Es necesario mencionar que la evaporación depende de la fuerza de circulación inducida por la diferencia de densidades entre el agua y la mezcla vapor-agua. El vapor saturado generado en la caldera y que se encuentra en la parte superior interior del domo fluye hacia el interior del supercalentador primario el cual se encuentra suspendido dentro del hogar. El vapor por este supercalentador recibe en primer lugar calor por radiación y convección en

la parte de los gases a alta temperatura. Una vez que el vapor pasa a través de los dos cabezales del supercalentador primario se dirige por la tubería de conexión al atemperador, el cual regula la temperatura del vapor que va a la turbina - haciendo esta regulación con agua en forma de vapor (spray) desde la salida de la bomba de alimentación. El vapor pasa de aquí al supercalentador secundario, el cual aumenta la temperatura del vapor por convección pero regulará como ya se dijo por el atemperador, de aquí el vapor pasa por la tubería principal para dirigirse a la turbina.

### Supercalentador

El supercalentador consiste en 2 secciones, normalmente el supercalentador primario (ó de baja temperatura) y el supercalentador secundario (ó de alta temperatura).

El vapor saturado seco es llevado desde el domo de vapor a la entrada del supercalentador primario por la tubería de conexión. El vapor pasa a través del supercalentador primario a la salida de éste (conexión).

El vapor continúa a la entrada del supercalenta-

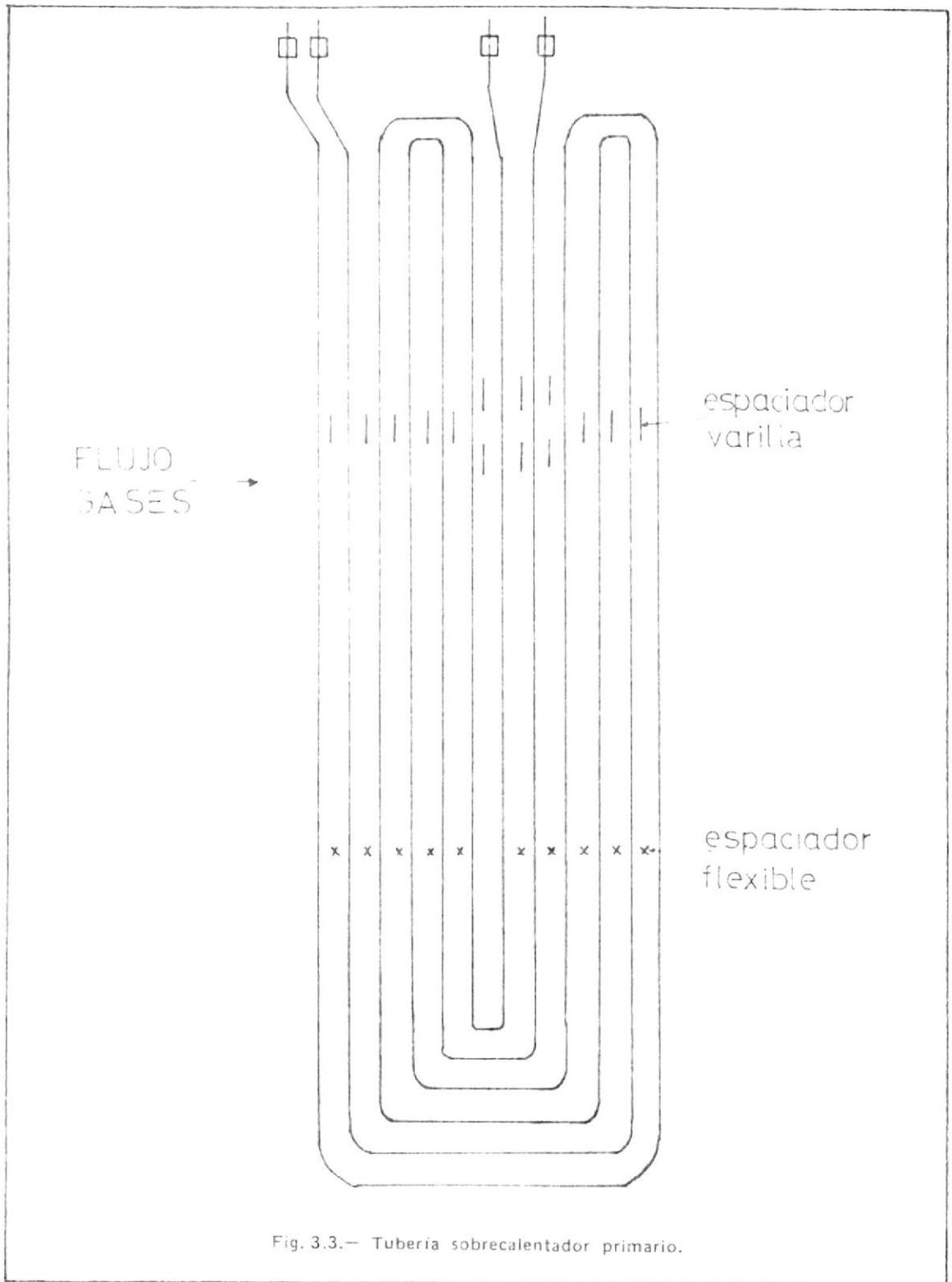
dor secundario pasando la tubería de unión la cual contiene el atemperador, éste es provisto de agua de alimentación para controlar la temperatura del vapor.

Vapor supercalentado pasa a través del supercalentador secundario y sale del mismo.

Tanto el ajuste del supercalentador, como los espaciadores de vapor enfriado, están referidos en el dibujo adjunto (Fig. 3.3 - Fig. 3.4).

Los espaciadores enfriadores de vapor son colocados sobre la parte baja posterior del sobrecalentador secundario el espacio a del ancho del hogar de los elementos del sobrecalentador es mantenido invariable por los espaciadores enfriadores de vapor y completa la parte superior de los elementos el enfriamiento del flujo de vapor desde el domo a la salida del supercalentador secundario por los espaciadores enfriadores de vapor.

El espacio que atravieza la profundidad del hogar del elemento supercalentador es mantener invariable el espacio por los espaciadores sólidos sobre la parte superior de los elementos y los espaciadores deslizantes en la parte inferior, el objetio



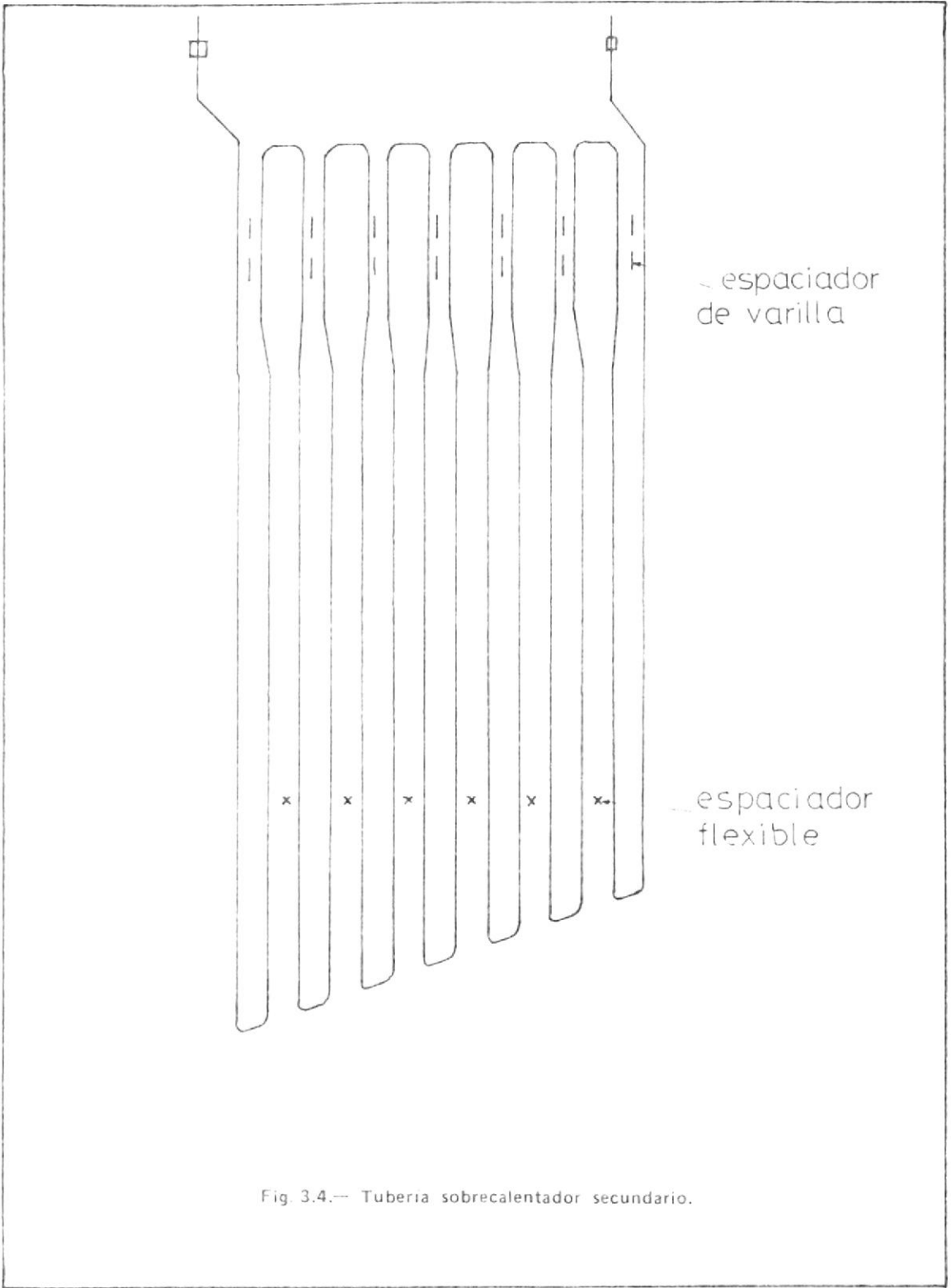


Fig. 3.4.— Tuberia sobrecalentador secundario.

vo mayor de los espaciadores sólidos es transferir el peso de los elementos intermedios hacia los tubos colgantes.

La razón para seleccionar el tipo de espaciadores deslizantes sobre la parte inferior es con el propósito de liberar los elementos de los tubos de expansión térmica ocurrida por la diferencia de temperatura del vapor a la entrada y salida de los elementos de los tubos.

Cuando la temperatura del vapor a la salida del supercalentador es alta, el atemperador controla la temperatura del vapor a la salida del supercalentador por inyección de agua de alimentación desde la salida de la bomba de alimentación a la caldera al pasar vapor. Normalmente, en el rango alto de carga mayor que la carga de control del supercalentador, la temperatura de salida del vapor es mantenida a una temperatura específica por medio de atomización de agua y a una carga menor, cae gradualmente al disminuir la carga.

#### ATEMPERADOR DEL SUPERCALENTADOR

Un atemperador es instalado en la unión entre el supercalentador primario y el secundario. El va-

por entra al atemperador desde la salida del cabeza del supercalentador primario y pasa a través de la entrada del cabezal del SC secundario.

Establecida de esta manera, la temperatura a la cual el atemperador está sujeto, son considerablemente menores que si estuviera localizado después del paso de alta temperatura. Así mismo, la posibilidad de llevar agua atomizada a la turbina es eliminada operando de acuerdo al procedimiento reseñado. Una tobera para atomizar agua con vapor es fijada en el extremo de entrada del atemperador para hacer posible reducir la temperatura del vapor, y mantener el mismo diseño de válvula.

El vapor para atomización del agua fluye continuamente desde el domo por la tubería de vapor de atomización a la tobera del atemperador, sea que esté o no fluyendo agua.

Una válvula de control, unida a una unidad de control automático, regula el flujo de agua de atomización suministrada al atemperador. Una válvula operada manualmente es provista a cada lado de la válvula de control y permite aislarla cuando es requerido.

La válvula de control manual en la línea de by-

pass alrededor de la válvula de control automático y las 2 válvulas de aislamiento son usadas sólo en caso de emergencia, y cuando la válvula de control automático requiere mantenimiento. La fuente de agua de atomización es del circuito de agua de alimentación. Es importante que el punto de partida de la línea esté localizado corriente arriba de alguna línea de inyección de químico. Es esencial que el agua de atomización sea químicamente pura y libre de sólidos para prevenir depósitos de éstos en el supercalentador y dirigirse a la turbina.

#### CARACTERISTICAS DE DISEÑO DEL SUPERCALENTADOR(ES)

TIPO

PARALELO Y COLGANTE

Superficie de calefacción

Etapa paralelo (primario)	431 m <sup>2</sup>
Etapa colgante (secundario)	920 m <sup>2</sup>
TOTAL	1351 m <sup>2</sup>
Presión de diseño	105 Kg/cm <sup>2</sup> g
Presión vapor salida supercalentador	91 Kg/cm <sup>2</sup> g
Temperatura vapor salida supercalentador	513°C
Método para controlar temperatura vapor	Atemperador rociador de agua

<u>COLOCACION ELEMENTOS</u>	<u>MATERIAL</u>	<u>DIAMETRO</u> (mm)
Supercalentador pri- mario.	SA213-T12	54.0
Supercalentador se- cundario.	SA213-T12 SA213-T22	54.0

### DOMO:

El propósito principal del domo de vapor es separar el agua de la mezcla vapor-agua producida por evaporación de alimentación. La función del domo de agua es alimentar a los cabezales inferiores de las paredes con la finalidad de que por termosifón se convierta en vapor saturado y llegue al domo superior. Tanto el domo de vapor como el de agua son hechos para un funcionamiento efectivo. Ver fig. 3.6 y 3.7.

La caldera está equipada con un gran domo de vapor para proveer una adecuada capacidad de almacenamiento de vapor y minimizar fluctuaciones de nivel como resultado de repentinos cambios en la demanda de vapor. El interior del domo está diseñado para combinar simplicidad y efi-

ciencia para producir bajos costos de mantenimiento y alta calidad de vapor. El arreglo interior del domo se muestra en la fig. 3.5.

La mezcla de vapor-agua que existe en el domo como resultado de la evaporación del agua de alimentación es recolectada en la cámara formada por paneles desviadores verticales, la separación primaria del vapor y del agua ocurre aquí. La mayor parte del agua después de impactar cae y pasa alrededor de los extremos de las paredes para mezclarse con el agua que entra. Parte del agua es sacada por perforaciones continuas en las tuberías de purgas en las puntas de altas concentraciones de sólidos.

El vapor y mucha agua es librada sobre la parte superior y extremos de los paneles ; cascadas en la parte principal del domo. De aquí el vapor húmedo pasa a través de las pantallas secadoras hasta que toda la humedad es removida.

Vapor seco sale fuera del domo a través de las toberas superiores exteriores. Para evitar paradas innecesarias de calderas hechas por fugas en el interior del domo, es importante supervisar el reemplazo de las partes del domo que fueren inspeccio-

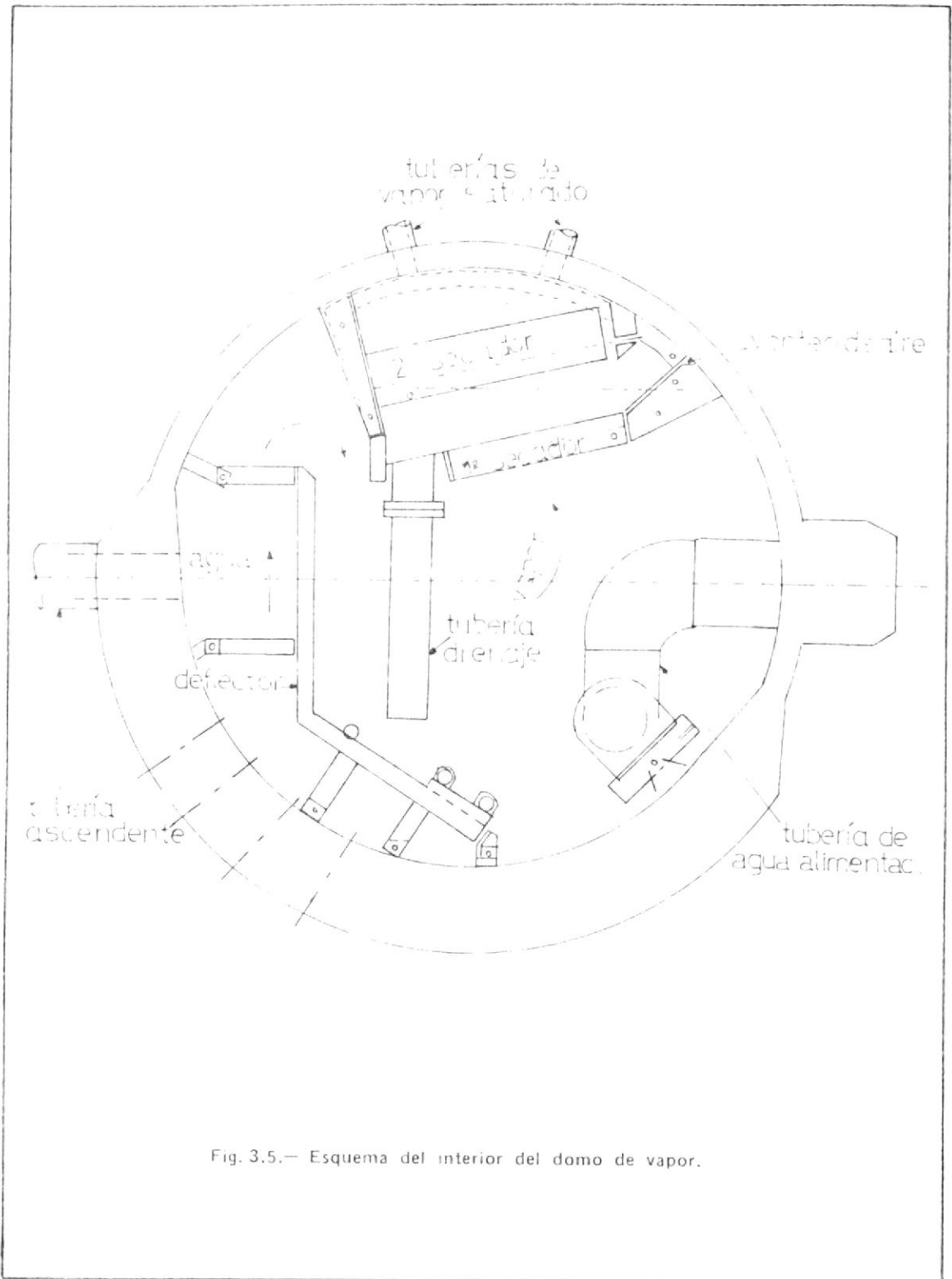


Fig. 3.5.— Esquema del interior del domo de vapor.

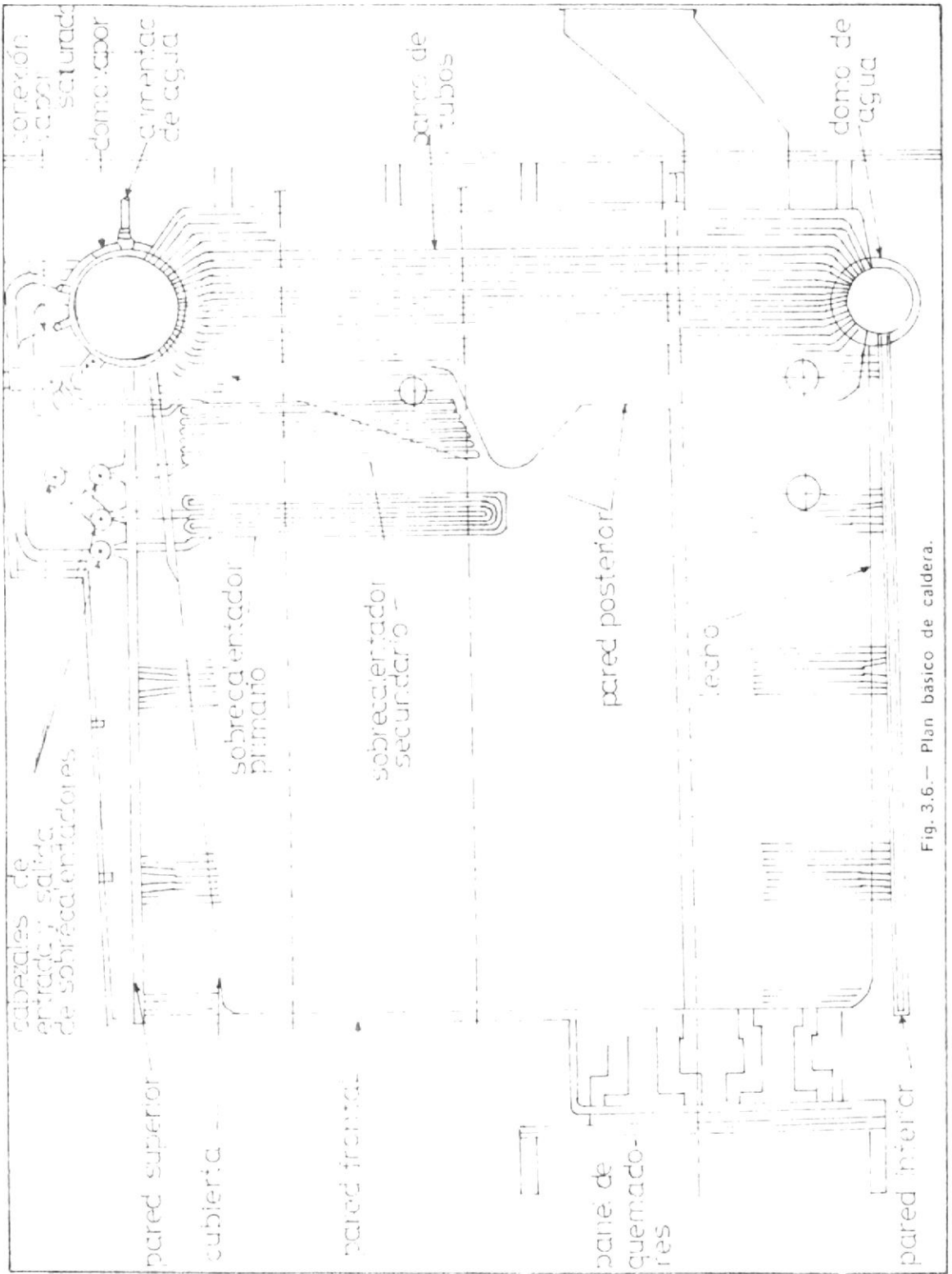


Fig. 3.6.— Plan básico de caldera.

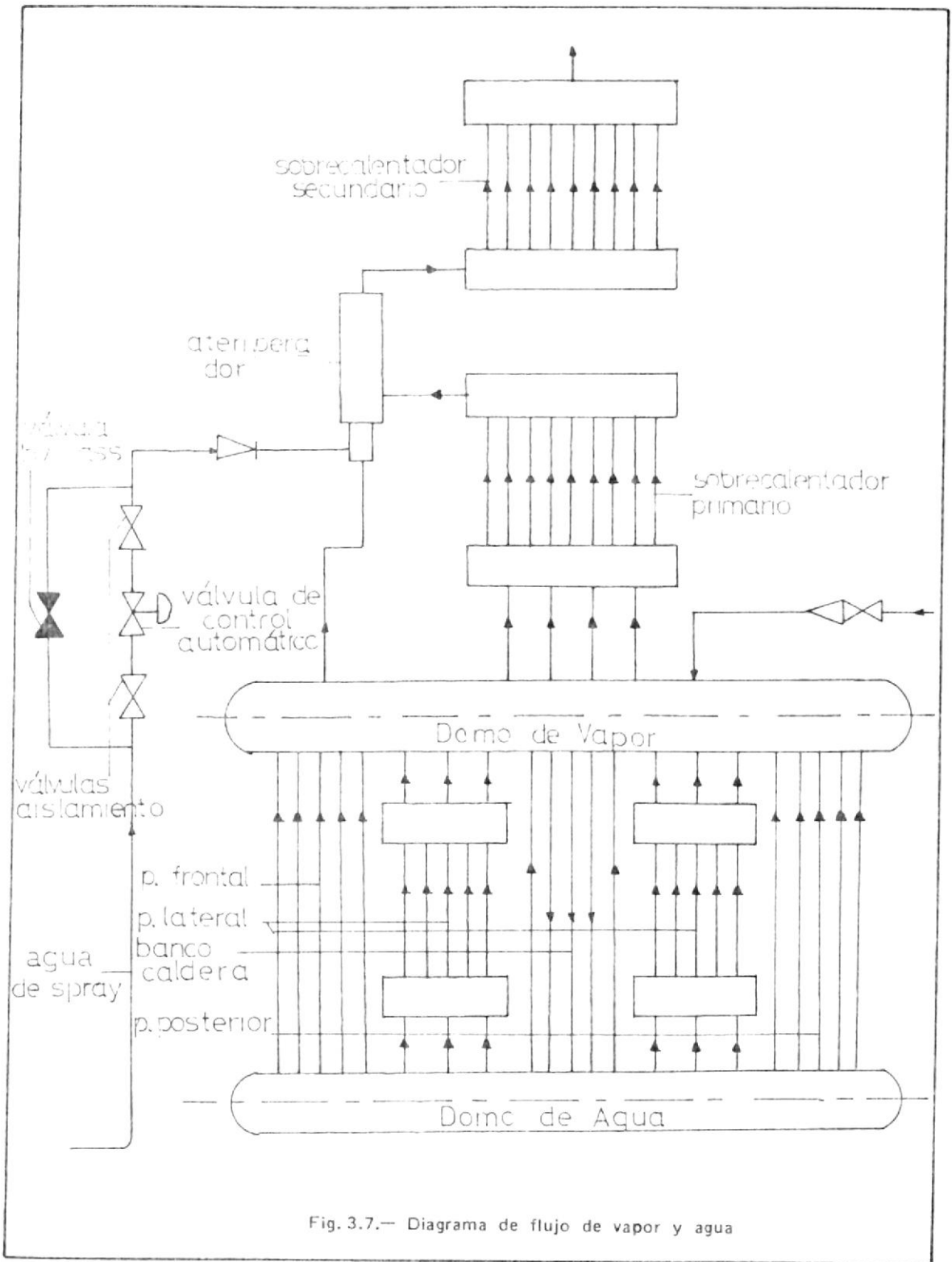


Fig. 3.7.— Diagrama de flujo de vapor y agua

nadas.

Las filtraciones pueden ocurrir por una variedad de condiciones. Una brida atornillada no puede estar totalmente unida y los pernos pueden ser inspeccionados y sacados.

Resumiendo las instalaciones del interior del domo así:

1. Estudio de los diagramas del interior del domo y comprensión del propósito de las diferentes partes.
2. Prevenir que la humedad de las pantallas superiores pase a través del by-pass y se mezcle con el vapor seco y salga por las uniones de ensamblaje del secador y el domo, las cuales deben estar absolutamente unidas, las uniones soldadas indicadas deben ser cuidadosamente hechas. Los pernos principales tienen 2 arandelas, una bajo la tuerca y otra bajo la cabeza (del perno). Las uniones deben ser solo unidas y no soldadas.
3. Las puntas en las partes correspondientes a las mamparas no necesitan estar absolutamente

apretadas, pero si lo más juntas posibles.

4. Todas las uniones atornilladas son reapretadas después de la colocación de todos los tornillos.
5. El uso de uniones bridadas protegen los pernos y ayudan a llenar los agujeros y grietas.
6. Empapetaduras no necesitan ser usadas.
7. Las partes de la tubería de alimentación son totalmente unidas. Las juntas de expansión no pueden estar localizadas en las curvas bajo el nivel de agua. Los soportes para la tubería - deben estar bien instaladas para evitar torciomientos.

Cuando se lleva la caldera para servicio, la alimentación de agua es sólo brevemente para hacer visible una o dos pulgadas en el visón de vidrio. Es deseable asignar un orden para expansión por calentamiento de caldera, desde el estado inicial a evaporar, y minimizar así la posibilidad de una repentina caída de presión cuando se alimenta agua fría.

El nivel de agua debe ser mantenido así, si no una anomalía se presenta cuando la caldera es

sacada de línea. Esto minimiza la posibilidad de que existan remanentes cuando la caldera es sacada fuera de servicio.

Purgas adecuadas deben ser reguladas. La inspección de rutina del domo debe ser hecha posterior a una salida de línea de la caldera, limpieza inicial, limpieza de rutina con ácido y durante salidas anuales. Durante estas inspecciones, los domos, en condición interior deben chequearse si están o no con depósitos, algunos de éstos podrían removerse limpiando con agua.

#### DOMO: CARACTERISTICAS DE DISEÑO

	<u>DIAMETRO</u> (mm)	<u>LONGITUD</u> (mm)	<u>MATERIAL</u>
Domo vapor:			
Mitad inferior	1604		
Mitad superior	1680	11.150	SA515-70
Medio	1642		
Domo agua:			
Mitad inferior	889		
Mitad superior	867	9.623	SA515-70
Medio	878		

### 3.1.2. Sistema de quemadores

Existen 6 quemadores para combustible Bunker C, dispuestos en dos hileras de 3, una superior y otra inferior, en la inferior se puede usar el mismo cañón de quemador cambiando la pastilla o tobera de atomización para quemar Diesel oil, esta operación se realiza para levantar presión en la caldera cuando se arranca desde el estado frío.

Los quemadores cuando son usados con Bunker se combina con vapor para producir la atomización adecuada del combustible que conjuntamente con el aire producirá la combustión. Mientras que en el caso de usar Diesel se combina con aire de atomización.

Se tiene además los quemadores piloto en número de 6, o también llamados encendedores, son usados para poner en servicio los quemadores de Diesel cuando se arranca la caldera desde el estado frío, ya que se encienden mediante ignición eléctrica provocada por una bujía. Ver fig. 3.8. Una vez que la caldera ha alcanzado presión suficiente,  $50 \text{ Kg/cm}^2\text{g}$  se hace el cambio de

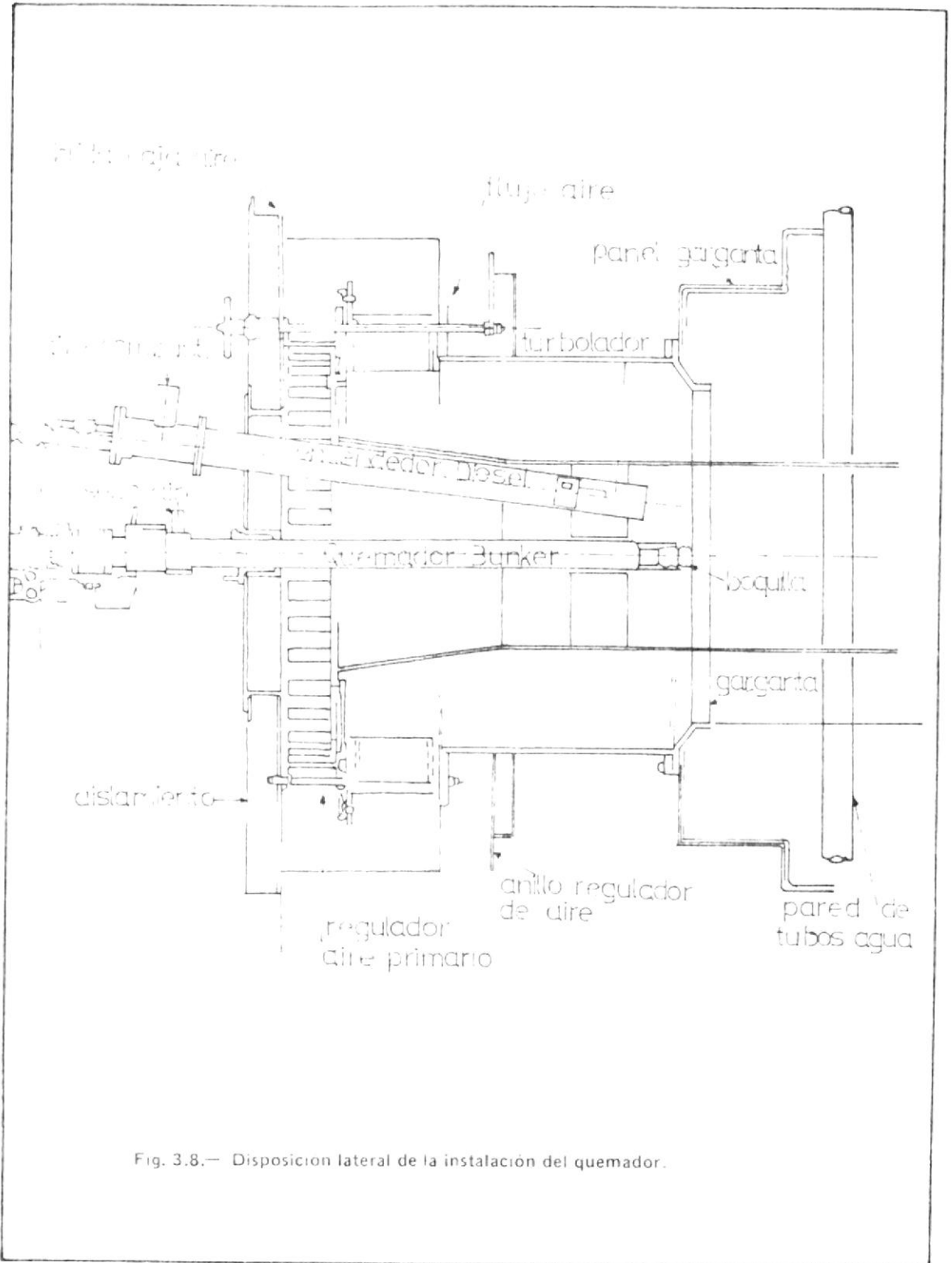


Fig. 3.8.— Disposición lateral de la instalación del quemador.

quemadores Diesel a los de Bunker, pero en ese momento de la operación se pone en servicio el quemador piloto, el cual utiliza diesel como combustible, encendiéndose eléctricamente como ya se dijo. El cambio de quemadores se hace uno por uno, controlando la presión del combustible y del fluido de atomización. Este cambio obedece a una secuencia de quemadores establecida por el fabricante.

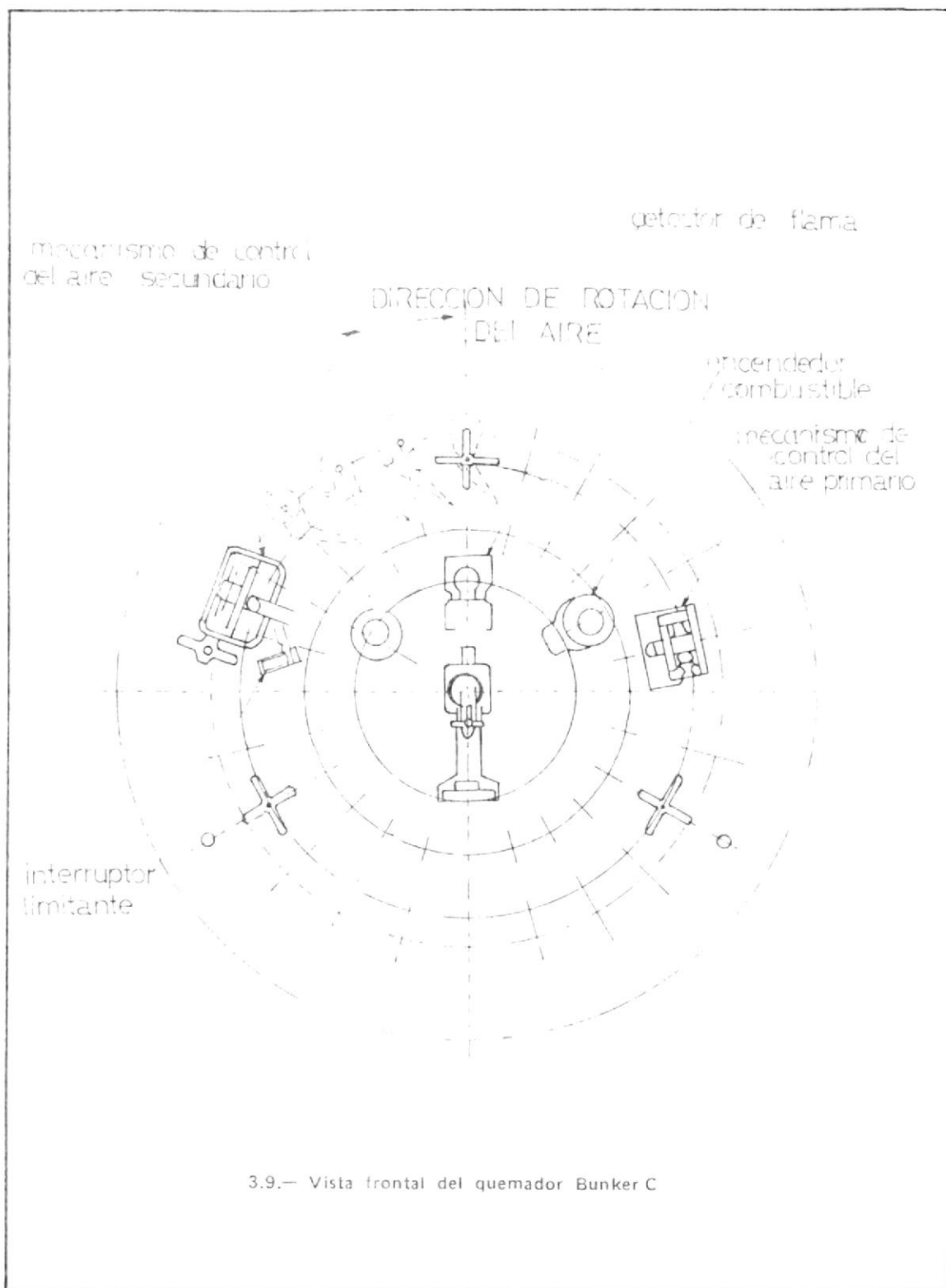
Los quemadores, por tanto están equipados con un conjunto de combustible y otro de vapor, usados para encender, calentar y operar la caldera.

El tubo se compone de una parte estacionaria ó cañón y una parte removible. La parte estacionaria consiste de un tubo guía y unión fija, el tubo guía forma parte integral del quemador, la unión fija está unida al tubo guía por medio de rosca. La parte removible consiste de la unión removible, 2 tubos concéntricos y el conjunto de tobera atomizadora. El objeto de los tubos concéntricos es conducir separadamente el combustible y el vapor de atomización hacia la pastilla o tobera, que es el punto donde deben mezclarse.

La longitud del tubo conducto está determinada de manera que la posición de la tobera sea adecuada con respecto a la garganta del quemador, ver fig. 3.8, 3.9 y 3.10.

La posición del tubo conducto dentro del tubo queda en mantenido por medio de guías. Además tiene ranuras de expansión para absorber la diferencia de expansión por temperatura entre tubos interior y exterior. Las uniones fijas y removibles del tubo conducto se unen con acoplamientos roscados y abrazaderas, anillos de cobre-asbesto sellan las uniones de combustible y vapor. El conjunto de tobera atomizadora consiste de un disco con varios orificios en su parte frontal y con un ángulo adecuado para dirigir la salida de la mezcla: bunker y vapor.

El diámetro y número de estos orificios dependen de la capacidad de la tobera. A cada uno de estos orificios de salida convergen dos orificios, el uno desde el conducto de combustible (lado exterior) y el otro desde el conducto de vapor (lado interior). El combustible y el vapor de atomización penetran al tubo conducto por la abertura superior e inferior respectivamente de la par



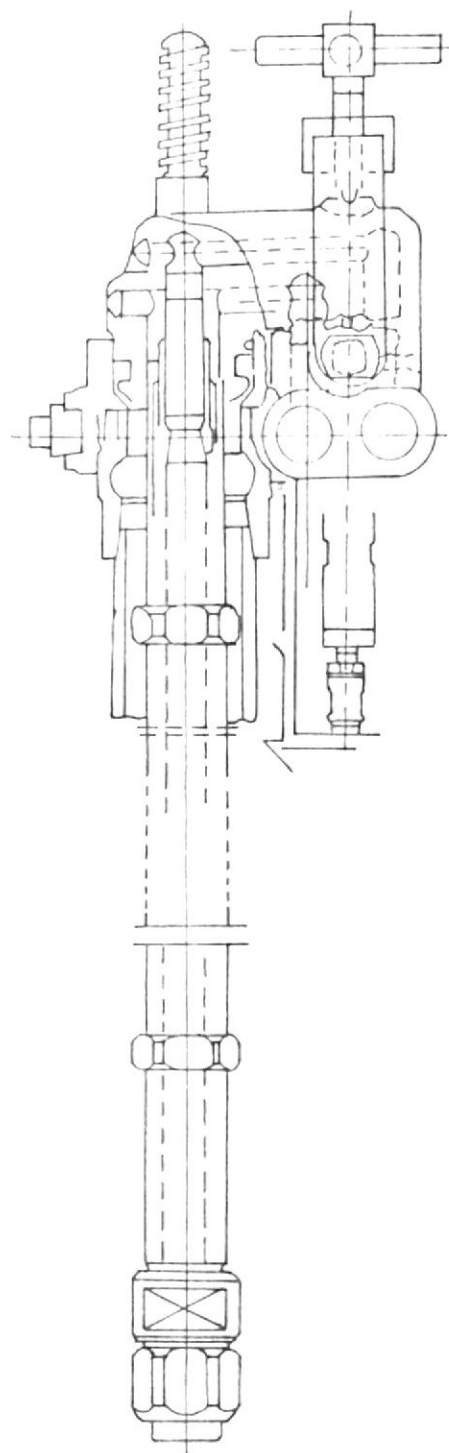


Fig. 3.10.— Esquema del quemador de Bunker C

te estacionaria, luego pasan separadamente por todo el largo del conducto removible. Ver fig. 3.10.

El vapor es conducido por la parte interior del tubo mientras que el combustible pasa por la exterior. La mezcla y atomización tiene lugar en la tobera o pastilla atomizadora. El combustible atomizado es descargado dentro del hogar en forma de finas partículas por los orificios de la tobera.

### 3.1.3. Sistema de registros de aire

Este sistema consta de un ventilador de tiro forzado, calentador de aire a vapor, calentador regenerativo, caja de aire y registros de aire. El aire pasa por cada uno de los equipos mencionados al interior del hogar para suministrar el oxígeno necesario para mantener la combustión.

La cantidad de aire requerida para la combustión es regulada automáticamente por la abertura de las aletas de admisión del ventilador de tiro forzado.

Los registros de aire dirigen el aire desde la

caja de aire hacia el quemador. Están compuestos por un anillo regulador de aire, registro secundario, registro primario y el conducto primario, en fig. 3.8 se aprecian componentes de este sistema.

El anillo regulador de entrada de aire es operado desde la fuente de los quemadores por medio de mecanismos de operación. Girando los volantes, el conjunto puede moverse hacia adelante admitida en el quemador, el objeto de este aro es distribuir uniformemente el aire entre todos los quemadores y alrededor de la periferia de cada uno. No debe usarse para regular el flujo de aire. Antes de poner en servicio la caldera por primera vez, la posición de este aro debe ajustarse para obtener igual presión estática en todos los registros de aire con la misma abertura de las aletas. Conexiones adecuadas son instaladas en 3 puntos cerca de cada mecanismo de operación para medir las presiones. Una vez que se obtiene la posición correcta del anillo regulador de entrada de aire, esta regulación no debe ser variada posteriormente.

El registro de aire secundario, que está localizado concéntricamente alrededor del quemador es ope

rado como un sólo grupo por medio de aletas y mecanismo de abertura. Las aletas imparten al aire secundario un movimiento rotativo y aumento de velocidad al entrar por la garganta del quemador hacia el hogar, mezclándose adecuadamente con el combustible atomizado. El movimiento giratorio y la velocidad del aire dependen no solamente de la abertura de las aletas sino también de la presión en la caja de aire. La presión en la caja de aire es por lo tanto afectada por la posición de las aletas en cada quemador, de la misma manera cuando se cambia la abertura de las aletas en cada uno de los quemadores, debe ajustarse la abertura de los demás quemadores en servicio a fin de obtener una verdadera imagen del resultado de estas variaciones. Una parte del aire es admitido por el registro de aire primario, su propósito es el de cubrir la pastilla (tobera) atomizadora para la combustión inicial y llenar el vértice interior formado por la combustión en la zona de aire secundario, previniendo así un retroceso de la llama dentro de la tobera atomizadora, evitando un sobrecalentamiento y avería.

### 3.1.4. Sistema de sopladores de Hollín

El combustible usado (Bunker C) en la combustión origina depósitos de ceniza o escorias sobre el hogar, paredes de tubos de agua, sobrecalentadores, caldera, y las superficies del calentador de aire regenerativo, dichos depósitos, deben ser limpiados periódicamente a fin de mantener los pasajes por donde fluyen los gases.

El sistema de sopladores de hollín, es un sistema de limpieza a vapor, consta de 2 sopladores de tipo retráctil y 4 de tipo rotativo, los primeros se usan para limpiar los elementos del supercalentador, mientras que los últimos se usan en las partes más "frías" de la caldera, ésto es, en las paredes de tubos. Además, se tiene un soplador de hollín de tipo rotativo para la limpieza del precalentador de aire regenerativo.

El movimiento de cada soplador se efectúa mediante un motor de inducción, se suministra vapor (ó aire comprimido) para alimentar las toberas múltiples del elemento soplador de hollín, el cual se controla por una leva que opera la válvula para que el soplado ocurra durante las fracciones

de arco que se desee, en el caso del tipo de sopladores rotativos, y no golpee sobre mamparas, o partes de la caldera que puedan sufrir algún dano. Debido a que los gases están a mayor temperatura que el metal de la caldera y que los elementos sopladores se acercan a la temperatura de los gases, los elementos se ajustan axialmente para que descarguen entre los tubos. Los elementos sopladores se revisarán para ajustar correctamente los soportes y que giren libremente en condiciones normales de operación. En los sopladores de tipo retráctil el movimiento se efectúa en círculo. Ver figura 3.11 a) y b).

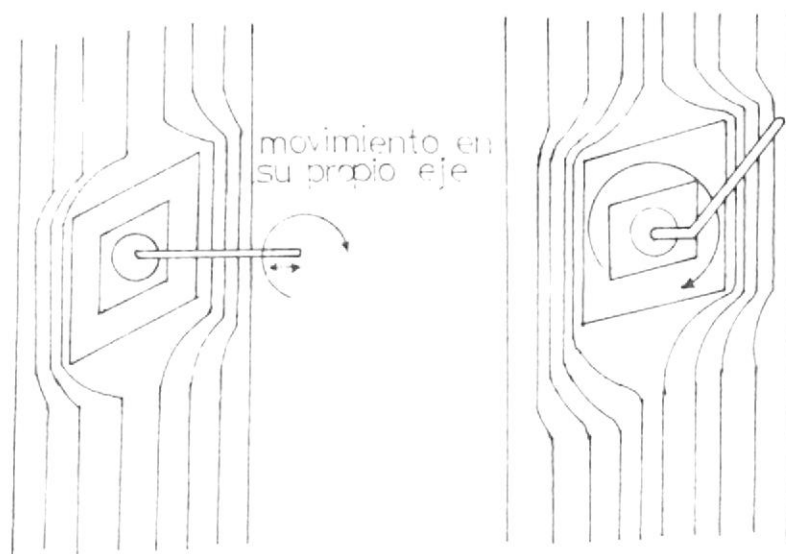


Fig. 3.11 (a)

Fig. 3.11 (b)

Fig. 3.11.- Sopladores de hollín: Tipo retráctil y rotativo

Para el sistema de soplado se utiliza vapor sobrecalentado tomado del primer colector del banco del sobrecalentador secundario. El grado de recalentamiento del vapor asegura que el soplado se efectúa sin humedad.

La humedad del vapor cuando entra en contacto con la superficie del hogar ó del elemento de la caldera que va a ser limpiado, debido a que éste se encuentra a una alta temperatura se origina un gran esfuerzo térmico provocado por el cambio brusco de temperatura. Por otra parte, la humedad formará lodos con el hollín lo que impedirá que se sople correctamente.

El vapor a la salida del cabezal tiene una presión aproximada de  $92 \text{ Kg/cm}^2\text{g}$ , la cual se reduce en la estación reductora por medio de la válvula de regulación la que se halla normalmente abierta hasta una presión de  $32 \text{ Kg/cm}^2\text{g}$ , también se tiene una válvula motorizada de regulación para luego entrar a alimentar al cabezal de los sopladores. El control puede ser automático o manual, la presión de cada soplador es ajustada para su más económica y efectiva presión de operación. En el control se usan instrumentos

tales como: controlador de presión, interruptor de presión, manómetro local, trasmisor de presión.

La línea de alimentación de vapor se divide en dos, la una para alimentar a los sopladores de cada pared lateral, y la otra a la línea de purga directa a un cabezal en cada pared lateral - provista con válvula de control. Cada soplador tiene válvula de compuerta para entrada de vapor a la válvula de control y de cada línea al soplador. El soplador en el calentador de aire regenerativo se lo usa con una presión de salida de  $15 \text{ kg/cm}^2$ , lo cual se logra con una válvula reguladora electromagnética.

Cada soplador en la pared de la caldera tiene una caja que le sirve de soporte y sello, debido a que el hogar es presurizado, este sello de aire evita la salida de los gases de combustión al exterior, el cual (sello) se lo alimenta desde la descarga del ventilador de tiro forzado.

Los sopladores retráctiles tienen 2 cámaras de sellos, una alimentada con aire desde los compresores de aire de planta y otra desde la descarga

de aire del ventilador de tiro forzado, el aire así usado les sirve como refrigerante para que no haya sobrecalentamiento excesivo en los sopladores.

Al iniciarse el programa de soplado, con la válvula de regulación que se halla normalmente abierta, se abre además la válvula motorizada de regulación, se abren las purgas durante cinco minutos, luego se purga por medio de las trampas de vapor y se procede al soplado, puede ser automático o manual, en todo caso sólo un soplador funciona a la vez. Los sopladores de tipo rotativo actúan durante 1 minuto mientras que los retráctiles lo hacen durante 4.5 minutos.

La frecuencia de soplado, debe efectuarse de acuerdo a la velocidad con que pierdan su limpieza las partes trasmisoras de calor, por experiencia se ha determinado que el programa de soplado debe efectuarse cada ocho horas.

Estas unidades de limpieza deben usarse observando: recorrido, ángulo de soplado y que estén debidamente protegidas pues se arruinará por sobrecalentamiento su fallaran en operación. En cada paro de caldera debe inspeccionarse el estado en que

se encuentran, haciendo los ajustes necesarios; analizar la consistencia de los depósitos y tomar determinaciones como resultado de las observaciones; las fotografías son muy buenos auxiliares en los historiales del equipo.

El hogar deberá ser inspeccionado a fin de asegurarse de que no existan grandes acumulaciones de ceniza, éstas deberán ser removidas antes de que lleguen a ser tan grandes que puedan dañar los tubos de las pantallas.

Los sopladores no deben usarse a menos que la caldera tenga por lo menos 30% de su capacidad. Esta precaución es con el objeto de evitar que la ceniza fina y el hollín sean rápidamente llevados fuera de la caldera, evitándose una posible mezcla explosiva de residuos de combustible y aire en la caldera. Antes de operar los sopladores se debe incrementar el tiro para reducir la posibilidad de que el hollín o flamas salgan por las puertas de inspección o algunas otras aberturas que además de seguridad, mantienen el equipo limpio. El incremento del exceso de aire ayuda a reducir el ahogamiento de la llama, lo cual se experimenta con el precalentador regene

nativo, ya que parte del hollín regresará al aire de entrada a los quemadores.

### 3.1.5. Calentador de aire regenerativo, C.A.R.

Consiste en un laberinto metálico, formado por hojas de metal arreqladas compactamente en conjuntos llamados tanastas, lo que da una imagen de tambor que gira lentamente, de manera que es calentado - por los gases y enfriado por el aire en forma alternada. Fig. 3.12. El precalentador de aire tipo LJUNGSTROM, sirve para calentar aire recuperando parte del calor que llevan los gases de escape que se dirigen a la chimenea. Las ventajas que se derivan del empleo de aire precalentado en la combustión son: conservación de la energía, combustión mejorada, quemar con éxito combustibles de baja calidad, aumento de rendimiento y aumento de capacidad. El aire caliente, al ser introducido en el hogar, aumenta la temperatura de éste y, como consecuencia, aumenta la transmisión de calor radiante a la caldera.

Miles de estas hojas metálicas, fig. 3.13, de alta eficiencia están espaciados y arreqlados comcompactamente dentro de doce compartimentos de for-

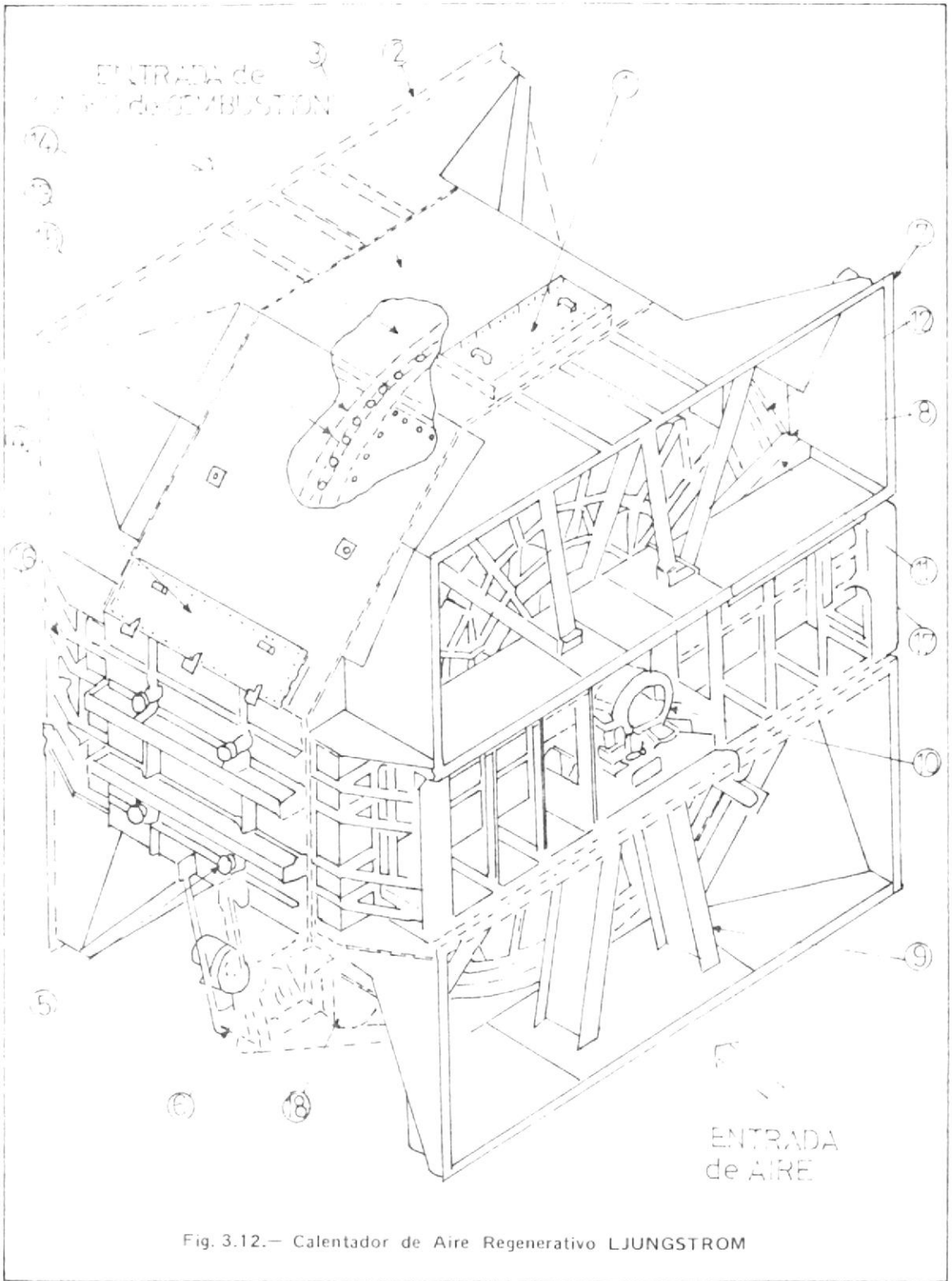


Fig. 3.12.— Calentador de Aire Regenerativo LJUNGSTROM

ma sectorial, dispuestos radialmente dentro de una caparazón cilíndrica llamada el Rotor. Los extremos circulares del rotor, conectan ductos adecuadamente sellados tanto radial como axialmente, formando un pasaje de aire de un lado a otro por una mitad del precalentador y un pasaje de gas por la otra mitad. El rotor es movido por un pequeño motor de 0.2 Kw con engranaje de reducción de 1:10.000, el rotor gira a 3 revoluciones por minuto.

Los gases que van a la chimenea fluyen por la parte superior a través de la mitad respectiva del laberinto, y el aire "frío" proveniente del calentador de aire a vapor fluyen por la mitad inferior.

Una punta divisoria evita todo lo posible que el aire y los gases se mezclen. El laberinto metálico está diseñado en forma para presentar la máxima superficie y ofrecer la mínima resistencia al paso del aire y los gases.

#### OPERACION DE LAVADO

El mecanismo de limpieza consiste de un motor eléctrico acoplado en un engrane de transmisión

de manivela el cual hace oscilar el cabezal giratorio el cual conduce a un tubo donde se hallan dispuestos tres hileras de toberas.

El medio de limpieza es conducido a lo largo del cabezal de toberas, fig. 3.14, una punta giratoria en la línea de suministro permite el libre movimiento del cabezal giratorio mientras está conectado a la fuente de suministro. El arco recorrido por las toberas y la rotación del rotor abarca la superficie entera de éste para la acción de limpieza a chorro de agua.

Las cenizas que se van depositando en el precalentador de aire en el lado de salida del aire "frío" se adhieren firmemente obstruyendo el libre paso del aire y los gases. Este problema se ve incrementado cuando el contenido de azufre es del orden del 1.2% en la composición del combustible como en el caso del Bunker C. Los gases de salida tienen compuestos de  $SO_2$  y  $SO_3$ , lo que hace que estas cenizas sean corrosivas por lo cual se hace necesario eliminarlas en forma efectiva.

El precalentador de aire regenerativo tiene instalado un sistema de lavado que comprende de líneas tomadas del sistema de agua de la ciudad,

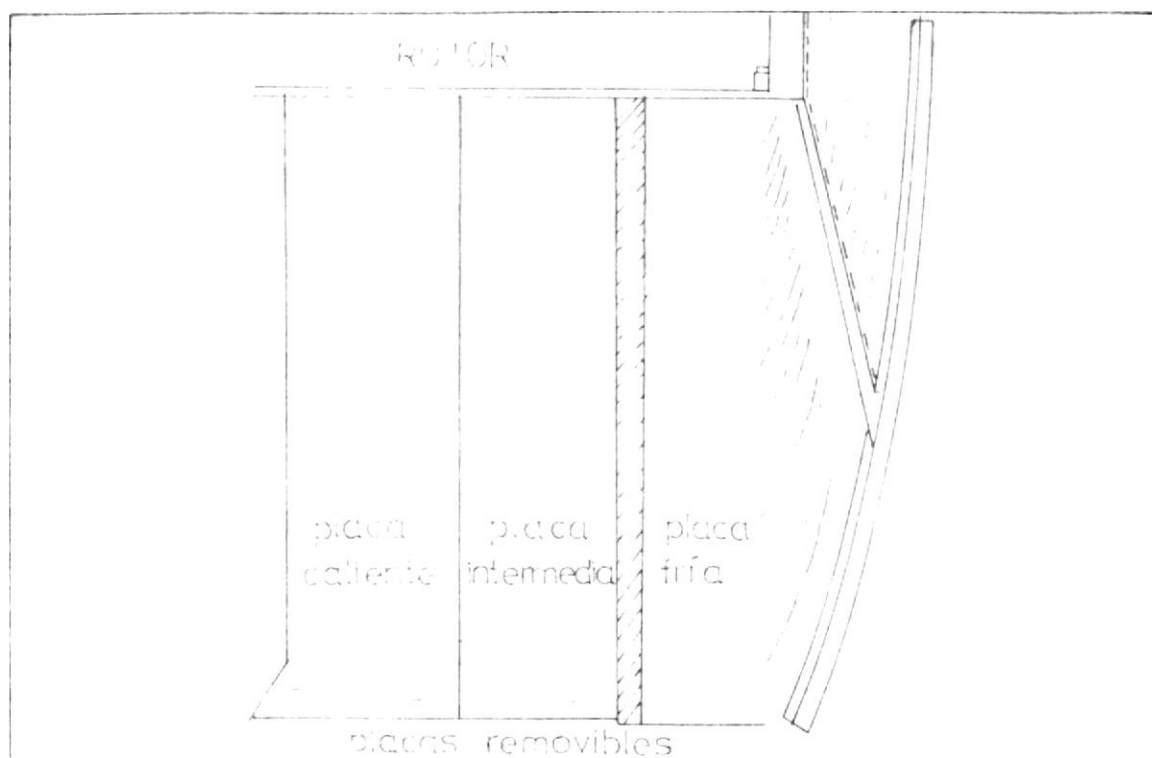


Fig. 3.13.— Elementos de calentamiento

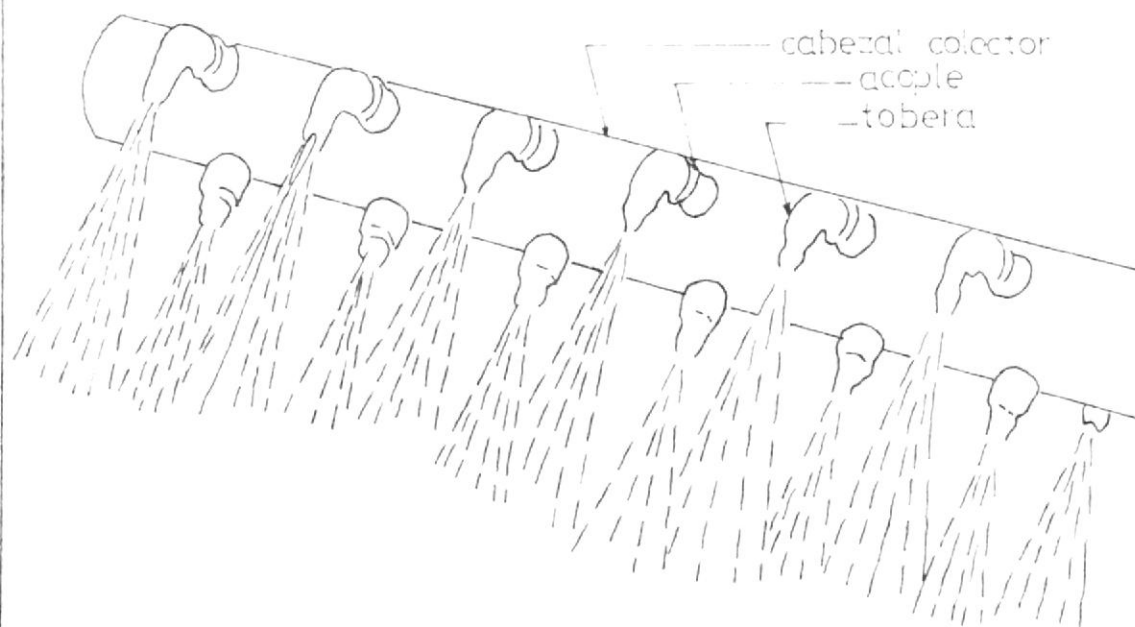


Fig. 3.14.— Sistema de lavado con agua

para cada lado del car; además se tienen instalados manómetros para control de la presión de flujo, la cual debe ser superior a los  $5 \text{ Kg/cm}^2\text{g}$ . En la parte inferior se tienen instaladas bridas para drenar el agua. El volumen de agua necesario es de 1350 lt/min. Es recomendable que esta agua de lavado tenga un Ph de 11, en caso de que no sea así, se debe aumentar el flujo. El lavado se efectúa con la caldera fuera de servicio y cuando la temperatura del flujo de gas de salida de caldera es menor de  $150^\circ\text{C}$ , mientras dure el lavado se debe mantener girando el precalentador.

El agua del dren debe observarse para cuando exista una diferencia de Ph de 0.1 entre el agua de entrada y salida se dé por terminado el lavado.

Mientras dure el lavado las compuertas del ventilador de tiro forzado de aire a quemadores y registros, deben permanecer cerrados.

El mejor tiempo de iniciar el lavado, es aquel que al terminarse coincida lo más posible con el principio de encendido de la caldera, para que los depósitos que no se hayan disuelto, estén con humedad el menor tiempo. Se justifica también llevar un historial con fotografías del estado del CAR

y de acuerdo con el análisis, se determinará la frecuencia de lavado.

Los sellos se hallan en ambos extremos del precalentador para minimizar el escape ya sea del lado del aire o del lado del gas ó para una mezcla de los mismos.

Los sellos del rotor, aún cuando están ajustados para huelgos, desde las superficies estáticas, llegan a tocar ligeramente a los móviles bajo altas temperaturas de operación. Si el borde del sello toca en algún punto, implica un desgaste, razón por la que es necesario revisar periódicamente los sellos y reemplazarlos cuando exista evidencia de desgaste excesivo; el rango de variación de huelgos varía entre 1 y 2 mm.

Los precalentadores de aire del tipo regenerativo, como en este caso, son equipados con sopladores de hollín, principalmente, para mantener la caída de presión a través de ellos en un rango razonable; el soplador de hollín está situado de manera que al operar cubra por completo la superficie del calentador y sopla en el sentido del movimiento del flujo de gases de escape.

## CARACTERISTICAS DE DISEÑO

TIPO	EJE HORIZONTAL LJUNGSTROM
NUMERO	1
SUPERFICIE DE CALEFACCION	11.630 m <sup>2</sup>
TEMPERATURA DEL AIRE (a 295 T/N)	Entrada 100°C Salida 336°C
CAPACIDAD DEL MOTOR	7.5 KW

Fig. 16. Calentador de aire a vapor

Es un intercambiador de calor, que proporciona al aire proveniente del ventilador de tiro forzado - el calentamiento necesario de tal manera que al entrar al calentador de aire regenerativo, lo haga con la temperatura suficientemente alta como para no permitir condensación del agua que se halla presente en el aire a temperatura y presión normal. En esta forma se protegen las superficies de calentamiento del calentador de aire regenerativo, que en caso contrario serían blanco de la acción del ácido sulfúrico.

El aire que entra al calentador de aire a vapor a unos 20°C, y sale aproximadamente a 100°C, el que al llegar al extremo "más frío" del calentador de

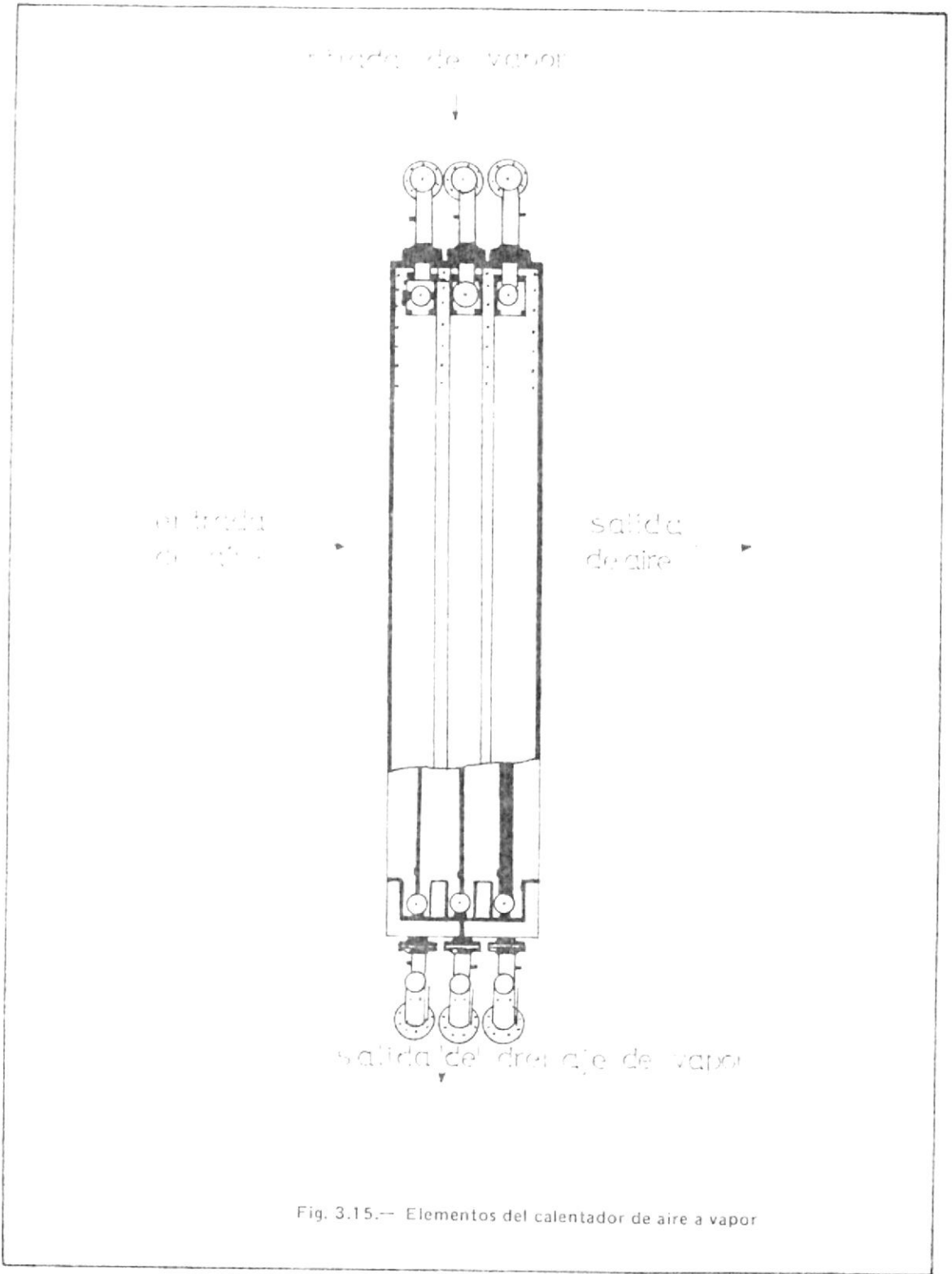


Fig. 3.15.— Elementos del calentador de aire a vapor

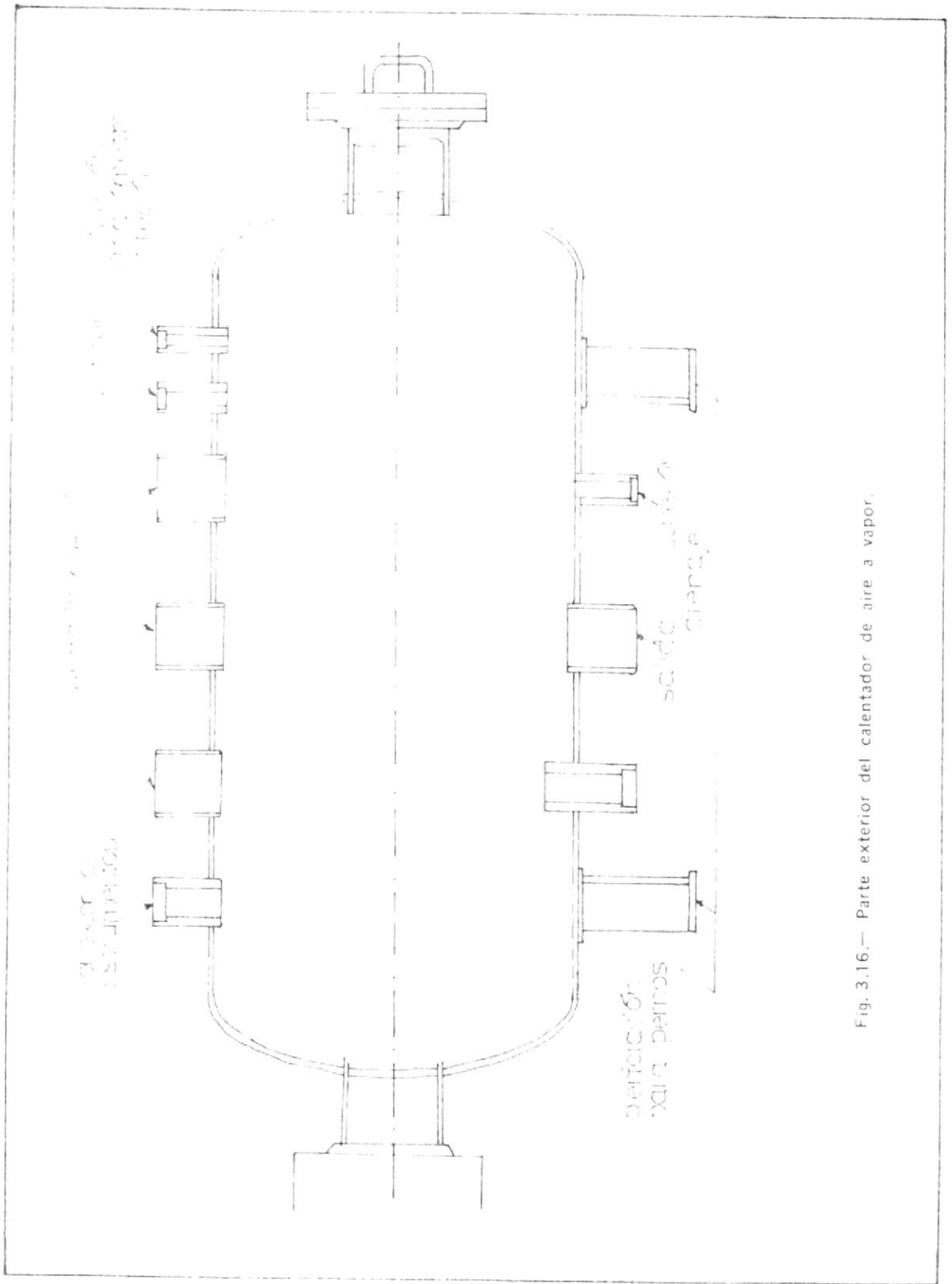


Fig. 3.16.— Parte exterior del calentador de aire a vapor.

aire regenerativo baja su temperatura teniendo en cuenta que ésta nunca debe ser menor que la de ro cío.

El calentador de aire a vapor consiste de elementos de recalentamiento removibles, se divide en 3 bancos, y por tanto los elementos de calentamiento con sus respectivos cabezales pueden ser removidos y reemplazados si allí hay evidencia de falla.

El tubo por donde ingresa el vapor llamado tubo de calentamiento, es de acero (15,9 mm. de D.E. x 2.00 mm. de espesor) y está instalado verticalmente entre los cabezales superiores e inferiores, poseen boquilla soldada (ver fig. 3.15).

Las cubiertas del calentador son planchas de acero de 6 mm. de espesor con soldadura reforzadas - por el miembro principal, las cubiertas son bien ajustadas con los ductos de aire por medio de bridas. La aleta o brazo, son placas de aluminio y está fijada al tubo de calentamiento.

El vapor calentado es admitido en el múltiple de vapor y se distribuye a cada cabezal. Mientras el vapor a 282°C está llegando hacia la parte infe-

rior se condensa corriente abajo y luego es almacenado en el tanque de drenaje.

El calentador de aire a vapor es del tipo de tubos aleteados verticales y flujo de aire horizontal. En la fig. 3.16 se muestra el calentador de aire a vapor en su aspecto externo.

#### PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

Tipo	Aleteado (lámina de aluminio)
Número	1
Superficie calefacción	610 m <sup>2</sup>
Temperatura de aire ambiente	18°C
Temperatura aire de salida	100°C
Temperatura vapor	282°C
Presión del vapor	13.36 Kg/cm <sup>2</sup> g.

#### 3.1.7. Ventilador de tiro forzado

La diferencia de presión conocida corrientemente por TIRO se expresa en milímetros de agua, y se mide por encima de la presión atmosférica. El tiro es necesario para el funcionamiento del hogar, con el fin de poder suministrarle el aire necesario para la combustión del combustible y arrastrar los gases quemados hacia el exterior a

través de la chimenea. Las resistencias opuestas al paso del aire en el caso de la Central, son: las de los conductos, chimenea, calentador de aire a vapor, calentador de aire regenerativo, el paso a través del hogar, la acumulación de hollín y ceniza en los pasos de gases, y la velocidad de combustión requerida.

En la planta se usa el tiro de tipo mecánico el cual se efectúa por medio del llamado ventilador de tiro forzado, el cual es de tipo centrífugo horizantal de piso individual, directamente acoplado con el motor de manejo por medio de engranajes acoplados. El flujo de aire liberado por el ventilador es controlado por ajuste de abierta de los conductos de entrada, el cual posee venas de entrada a manera de persianas que se abren y cierran a voluntad, de acuerdo a las necesidades. El ventilador posee principalmente la cubierta, eje del rotor, rueda impulsora, cojinetes y venas de entrada (fig. 3.17).

#### CUBIERTA

Está compuesta de las cajas de succión, voluta y caja de salida, las cuales están fabricadas mediante placas de acero soladas. La cubierta está

dividida en varias secciones a fin de facilitar el transporte, ensamblaje, y remoción del rotor, rueda impulsora y demás partes componentes por juntas de bridas, de tal forma que no permiten fugas de aire,

Las cajas de succión, voluta y caja de salida son diseñadas para conducir el aire con un mínimo de fricción, y de esta manera incrementar el rendimiento del ventilador, además las dos primeras poseen agujeros de drenaje y bocas de inspección para la conveniencia del mantenimiento.

#### EJE DEL ROTOR Y RUEDA IMPULSORA

La rueda impulsora está construida con placas de acero curvadas y soldadas a una placa central construida con acero de alta resistencia y reforzada mediante anillos protectores. El eje del rotor está diseñado para adaptarse al flujo de aire entrante, y la placa central está remachada al patrón del eje del rotor.

La rueda impulsora una vez acoplada al eje es balanceada dinámicamente a fin de minimizar un desbalance en la rotación y vibración durante la operación. El eje del rotor es acoplado al motor de

mando, mediante engranajes.

#### COJINETES

Los cojinetes son de autoalineación, anillos ac i-  
tantes, agua enriada, de tipo casquillo. El coji-  
nete del lado del motor es ajustado mediante un me  
tal de empuje tipo transmisor a fin de conducir el  
ventilador frente al collar de empuje integrado con  
el eje del rotor.

Mientras que el collar de empuje del otro lado del  
motor es localizado con un claro suficiente desde  
el cuerpo del cojinete, el collar también posee un  
deflector de aceite a fin de prevenir la filtra-  
ción de aceite hacia el exterior. Tuberías flexi-  
bles especiales son usadas para enfriar el agua de  
la caja de cojinetes, poseen además instalado un  
indicador de flujo en cada línea externa de agua  
de enfriamiento a fin de chequear el flujo de agua.

Las cajas de los cojinetes son de hierro fundido y  
provistos de un manómetro con nivel de aceite y u-  
na boquilla de inspección localizada en la parte su  
perior de la caja, a través de la cual se pueden ob  
servar los anillos de aceite girando y se puede ali  
mentar de aceite lubricante a través de ella.

### ASPAS DE ENTRADA

Se usan para controlar el flujo de aire, diseñadas para dirigir el flujo de aire en la dirección de rotación del impulsor a fin de que el rendimiento del equipo sea suficientemente alto. Veinte aspas son dispuestas en cada entrada del ventilador, poseen un anillo retenedor fijado al anillo impulsor para prevenir volutas.

En la fig. 3.17 se puede apreciar el ensamblado de los elementos que conforman el control de entrada de aire realizado por las venas ó aspas de entrada.

Los pasadores son fijados a las palancas del agua mediante tuercas, apoyadas en acanaladuras hechas en espacionamientos iguales sobre el anillo impulsor.

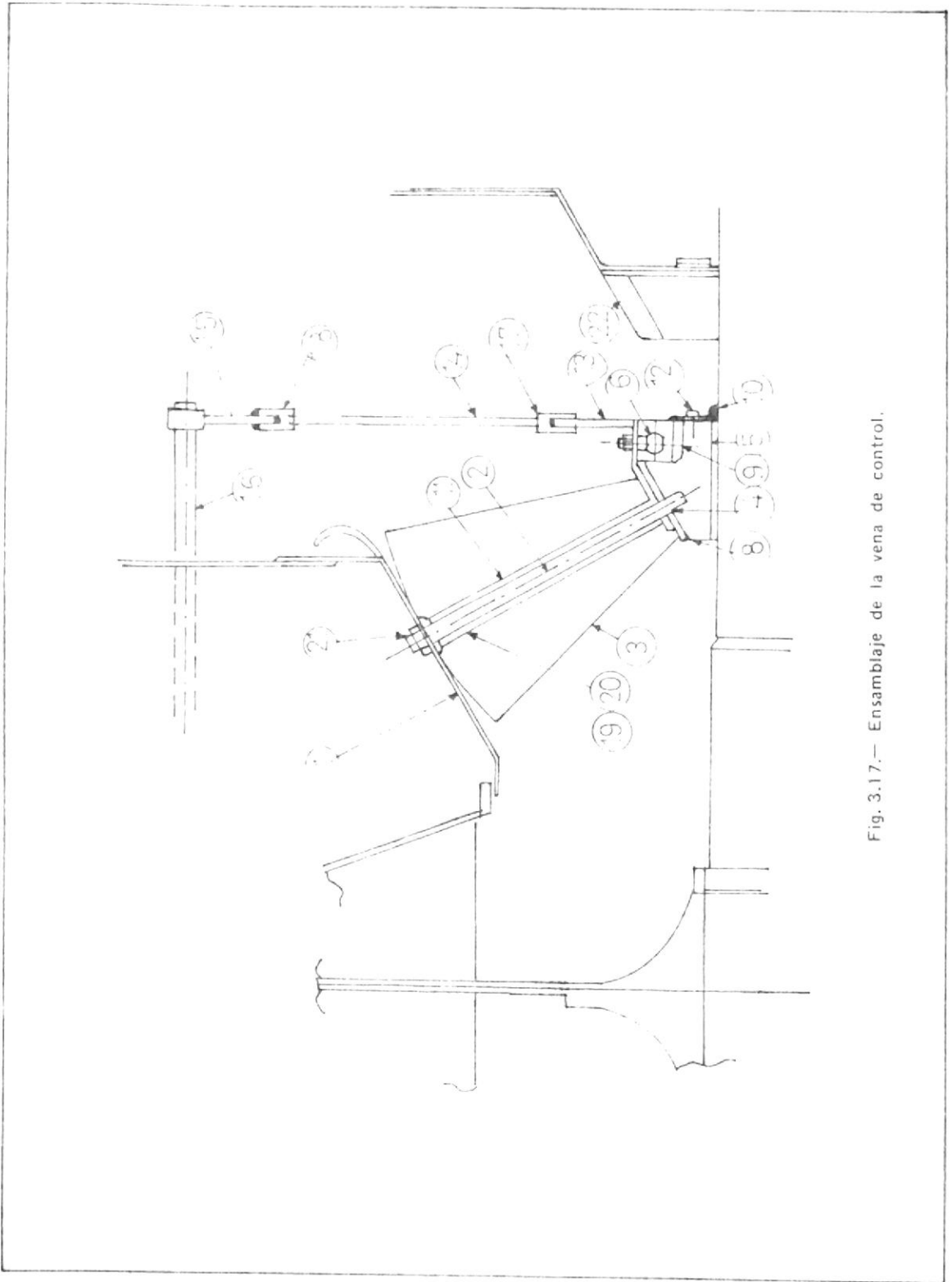


Fig. 3.17.— Ensamblaje de la vena de control.

## CARACTERISTICAS DE DISEÑO

Tipo	Doble entrada de aire
Velocidad	1180 RPM
Volumen	5100 m <sup>3</sup> /min.
presión succión	- 40 mm H <sub>2</sub> O
presión liberación	670 mm H <sub>2</sub> O
Introdiente	aire
Salida	830 KW
Voltaje	2300 volts.
Ciclos	60 Hz.

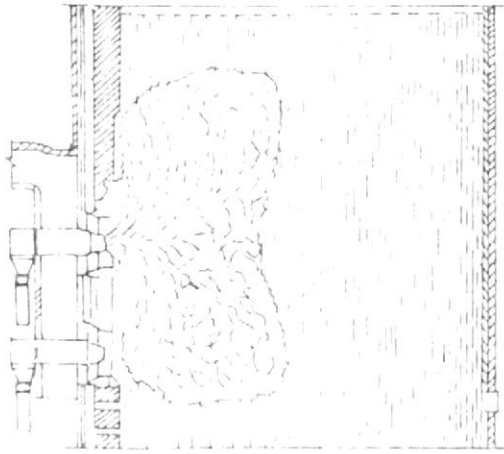
### 3.2. PROCESO DE COMBUSTION

Como se indicó, el anillo regulador debe ser totalmente abierto antes del encendido inicial y luego ajustar la posición correcta cuando los quemadores están en servi  
cio, esta posición será permanente.

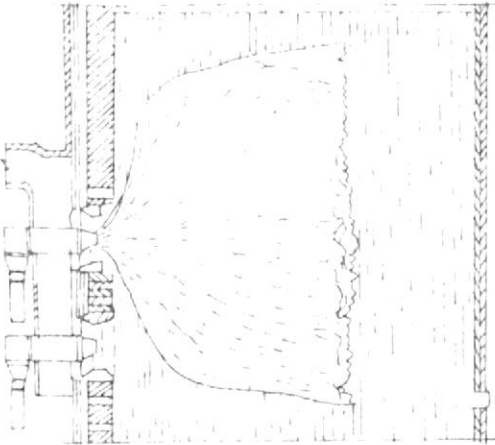
Al iniciar los fuegos, con el hogar frío, los encendidores deben encenderse, con una mínima presión en la caja de aire y las aletas de los registros cerradas.

Justo antes de encender un quemador, se abrirán ligeramente las aletas de los registros, en cuanto el quemador se enciende las aletas de los registros deben abrirse - gradualmente, y fijadas en la posición adecuada y pre  
viamente establecida, para obtener una perfecta combustión.

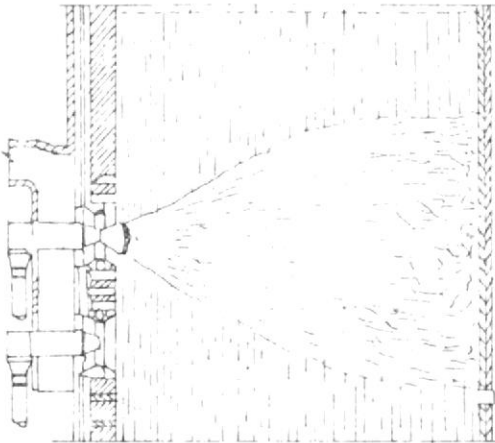
Durante la operación normal, después de que el anillo re  
gulador ha sido fijado para una distribución de aire uni  
fome, la correcta abertura de las aletas de los regis  
tros depende de factores y condiciones locales que de  
ben determinarse para cada instalación. Las observaciones de los fuegos, mediciones de temperaturas y presiones en el hogar, temperaturas de los tubos recalentadores, temperaturas de los gases de escape, etc. deberán ser chequeadas periódicamente.



a) Llama demasiado corta



b) Llama correcta



c) Llama demasiado larga

Fig. 3.18.— Formas típicas de llama

La apariencia general de la llama dentro del hogar puede servir de pauta para determinar la abertura de las aletas. La fig. 3.18 A y 3.18 C muestran dos extremos, mientras que la fig. 3.18 B muestra una condición satisfactoria. Generalmente reduciendo la abertura causará un acortamiento de la longitud de la llama y ésta tocará la pared frontal del hogar, fig. 3.18A, mientras que una excesiva abertura, fig. 3.18 C, aumentará la longitud de la llama y esta tocará la pared posterior del hogar. La condición intermedia, fig. 3.18 B, es la adecuada.

La necesaria cantidad de Kg. de aire por minuto que se necesitan para quemar una determinada cantidad de combustible, puede ser regulada ya sea por una baja presión en la caja de aire y una amplia abertura de las aletas de los registros de aire o con una alta presión en la caja de aire y una reducida abertura de las aletas.

Una vez que la favorable condición de abertura de las aletas ha sido fijada para la carga normal de operación, no debe ser variada posteriormente. El flujo de aire requerido es controlado por las aletas de admisión del ventilador de tiro forzado. Si fuere necesario operar a cargas superiores de las normales, un a-

juste adicional de la abertura de las aletas será necesario.

Cuando la caldera debe trabajar con uno o más quemadores apagados, las aletas de los registros de aire de estos quemadores deben permanecer ligeramente abiertas para no permitir entrada de aire en exceso, pero sí una pequeña cantidad para mantener "fresco" el material.

Con el fin de obtener un encendido seguro, un "alto flujo de aire", debe mantenerse después de la operación de purga del hogar durante toda la operación de calentamiento de la Unidad hasta que la caldera entre en línea y la carga alcance el punto donde el flujo de aire debe incrementarse para sostener cargas más elevadas. Se entiende por "alto flujo de aire" como el máximo permisible para mantener la temperatura del vapor en los límites adecuados, este flujo alcanza el 30% del máximo flujo.

Las aletas de los registros de aire deben abrirse durante la operación de purga del hogar y durante el encendido y calentamiento de la unidad para permitir el flujo de aire requerido.

Cuando la unidad se encuentra en servicio, el total de aire requerido está en función de la carga que tiene la

caldera, es decir, el flujo de aire sigue al flujo de vapor; el correcto flujo de aire de la carga determinada depende de las características del combustible y de la cantidad de exceso de aire. El analizador de gases ORSAT, determina las condiciones de los gases de escape y por lo tanto se puede comprobar el correcto flujo de aire.

En la fig. A.2 se observa la correcta condición de operación de caldera recomendada por los fabricantes, en el que además de la condición de operación de los quemadores de los registros de aire y anillo regulador, se da en el gráfico porcentaje de oxígeno versus carga (MW), la cantidad correcta de oxígeno que debe estar presente para una carga dada.

En la fig. A.3 se puede observar la relación del volumen de  $O_2$  versus el exceso de aire. Es decir, para una cantidad dada de  $O_2$  a una carga dada (fig. A.2) corresponde un exceso de aire dado (fig. A.3).

Mediante las figs. A.2 y A.3, ha sido posible elaborar la tabla 3.1: "GENERACION REAL: Bunker C", a diferentes cargas. También se ha usado otro método para determinar el exceso de aire, basada en el porcentaje volumétrico de los componentes de los gases de combustión, lo cual corrobora los resultados obtenidos ya vistos.

TABLA 3.1

GENERACION REAL: BUNKER C

GENERACION (M)	73	55	36	18
$O_2$ (%) OPSAF	0.8 - 1.1	1.55 - 2	3.3 - 4	9.2
$CO_2$ (%) OPSAF	15.28 - 15.05	14.67 - 14.29	13.32 - 12.86	12.12
Exceso aire (%)	3 - 4.5	7.2 - 10	17.5 - 22	77
$\frac{Kg \text{ aire real}}{Kg \text{ Bunker}}$	14.42 - 14.63	15 - 15.04	16.45 - 17	24.78
$\frac{Mol \text{ aire real}}{Mol \text{ Bunker}}$	49.73 - 50.45	51.76 - 53.11	56.73 - 58.9	85.46
$\frac{Mol \text{ Humo h\u00fam.}}{Mol \text{ Bunker}}$	53.38 - 53.96	55 - 56.12	59 - 60.8	82.35
$\frac{Mol \text{ Humo seco}}{Mol \text{ Bunker}}$	46.55 - 47.12	48.15 - 49.2	52 - 53.79	74.77
Moles $H_2O$ en el aire	1.04 - 1.06	1.08 - 1.11	1.19 - 1.23	1.79
$H_2O$ (%) en base de combustion	12.8 - 12.69	12.49 - 12.3	11.8 - 11.55	9.2
Presi\u00f3n parcial (psia)	1.88 - 1.87	1.84 - 1.81	1.74 - 1.70	1.35
Temperat. punto roc\u00edo ( $^{\circ}C$ )	51 - 50.9	50.57 - 50.24	49.44 - 48.98	44.44

AIRE TEORICO = 14 Kg/Kg Bunker = 48.28 Mol/mol Bunker

Luego se determina el punto de rocío real del Bunker C a diferentes cargas, es decir, usando el respectivo exceso de aire para una carga dada y además de considerar el porcentaje de agua contenida en el aire.

En el apéndice B se puede examinar en la tabla B.4 "Datos de operación de caldera", en la cual se detalla el tiro del sistema de combustión, las condiciones de trabajo del calentador de aire a vapor, del calentador de aire regenerativo, del domo, sobrecalentador, bomba de combustible, calentador de combustible, presión del combustible y del vapor de atomización.

En la tabla 3.2 se puede apreciar un informe típico - mensual emitido por el personal técnico de operación de la Central Estero Salado, el cual se refiere a PRODUCCION, RENDIMIENTO Y CONSUMO (Mes de Diciembre del año 1981, de la Unidad # 3), los diferentes puntos - allí enumerados son explicados a continuación.

TABLA 3.2

CALCULO TIPICO MENSUAL CENTRAL TERMICA ESTERO SALADOPRODUCCION, RENDIMIENTO Y CONSUMO

MES: Diciembre AÑO: 1.981	UNIDAD # 3 INECEL-DOSNI
1. Potencia máxima generada (MW)	75
2. Generación Bruta (MWh)	49770
3. Factor carga (%)	91
4. Consumo de energía (MWh)	2004
en auxiliares (%)	4
5. Consumo de combustible (lts x 1000)	12.889,73
6. Rendimiento térmico neto (Kcal/Kwh)	2.666
7. Producción total vapor (Tbn)	197.340
8. Eficiencia promedio de la caldera a 73 MW (%)	91
- Agua de reposición usada (% vapor producción)	1.45
- Consumo total agua potable (Tbn)	8200
- Agua desmineralizada de reposición usada: EMPAG (Tbn)	2855
- Consumo productos químicos	
Soda cáustica (kg)	4770
Acido sulfúrico (Kg)	2520
Hidracina (Kg)	53
Fosfato trisódico (Kg)	10
- Stock mínimo combustible (lts x 1000)	10.867

EXPLICACION DEL INFORME MENSUAL

1. Potencia máxima generada: es el valor máximo de la Demanda Máxima registrada en el período de un mes, este valor se saca de los Informes diarios de Carga y características de operación, MW.
2. Generación Bruta: es el dato de la suma de generación de todos los días que generó la Unidad en un mes, obtenido del punto 2 del informe Diario de Carga y Características de Operación, MWH.
3. Factor de carga: Es el valor resultante (cuociente) de la Generación media durante el mes, dividido entre la Carga Máxima que llevó la unidad en el mismo lapso. La Generación media se calcula dividiendo la Generación bruta entre las horas de operación del turbogenerador.

$$F_C = \frac{PMG \times 100}{HO-TG \times DM}$$

- 3.1. Horas de operación.- es la cantidad de horas que generó la Unidad en el período de un mes, este dato se calcula de la suma de horas diarias que generó la Unidad, o también el turbogenerador.

4. Consumo de energía: es el dato de la suma de generación consumida por los equipos, de la energía que generó la Unidad en el período de un mes, MWH.
  - 4.1. En auxiliares.- resulta de dividir el consumo de energía (punto 4) para la generación bruta (2) y multiplicado por 100.
5. Consumo de combustible: es el dato del combustible consumido durante el período de un mes, es el valor de la suma de lo consumido diariamente por la unidad, se expresa en lts x 1000.
6. Rendimiento Térmico neto: es el cuociente que resulta de dividir el punto 6.1 ó cantidad de calor para la diferencia entre la generación bruta menos el consumo de energía. Las unidades en (Kcal/KWH)
  - 6.1. Cantidad de calor.- resulta de multiplicar la cantidad de combustible por el poder calorífico inferior (10400 Kcal/Kg) del combustible (valor oficial) y por el factor de conversión 0.95 Kg/lt., las unidades se dan en (Kcal).
7. Producción total de vapor: es el dato que resulta de sumar la producción diaria de vapor durante el período de un mes por el generador de vapor (Ton.)

8. Eficiencia promedio de la caldera a 73 MW(%): Esta eficiencia es tomada en una forma simplificada, con siderando las temperaturas de entrada y salida del aire para combustión y los gases combustionados. En la sección 5.3 del capítulo 5 se realizan estos cálculos en una forma más detallada. Ver tabla 5.5B. Los demás datos son valores comunes que se dan mensualmente en la planta.

El sistema de combustión consta de dos partes:

- El sistema de combustible; y
- El sistema de aire para la combustión, que también fue descrito en el punto 3.1.3.

#### SISTEMA DE COMBUSTIBLE

El combustible llega al muelle, desde donde es bombeado al Tanque de Almacenamiento de Combustible, el cual tiene una capacidad de 2'000.000 litros, de aquí por medio de cualquiera de las tres bombas disponibles, se lo envía a los Tanques Diarios de Almacenamiento de Combustible, según las necesidades. Es de reca car que el combustible para hacer estas operaciones requiere calentamiento, para lo cual cada Tanque o reservorio posee su equipo intercambiador de calor.

El combustible almacenado en los tanques diarios es impulsado por una de las dos bombas de combustible a una presión aproximada de  $19 \text{ Kg/cm}^2$  y  $40^\circ\text{C}$  de temperatura. Luego pasa por el filtro del medidor, para dirigirse posteriormente a uno de los dos calentadores de vapor, en donde incrementa su temperatura hasta llegar alrededor de  $100^\circ\text{C}$ . Después del calentador pasa por el filtro de salida, medidor de flujo, válvula de regulación, válvula magnética de disparo y cabezal de quemadores, del cual se distribuye a cada quemador (que se encuentre en servicio), para ser introducido dentro del hogar junto con aire para alimentar la combustión (ver fig. 3.19). La válvula de regulación controla automáticamente la cantidad exacta de combustible que debe pasar a los quemadores, para objeto de mantener una presión determinada en la caldera.

La válvula magnética de disparo se cierra e impide el paso de combustible a los quemadores, cuando recibe una de las señales de protección de caldera.

El sistema de combustible incluye además la bomba, tanque y líneas de diesel oil, que se usa en los quemadores para iniciar el encendido de la caldera y los quemadores para el sistema de ignición.

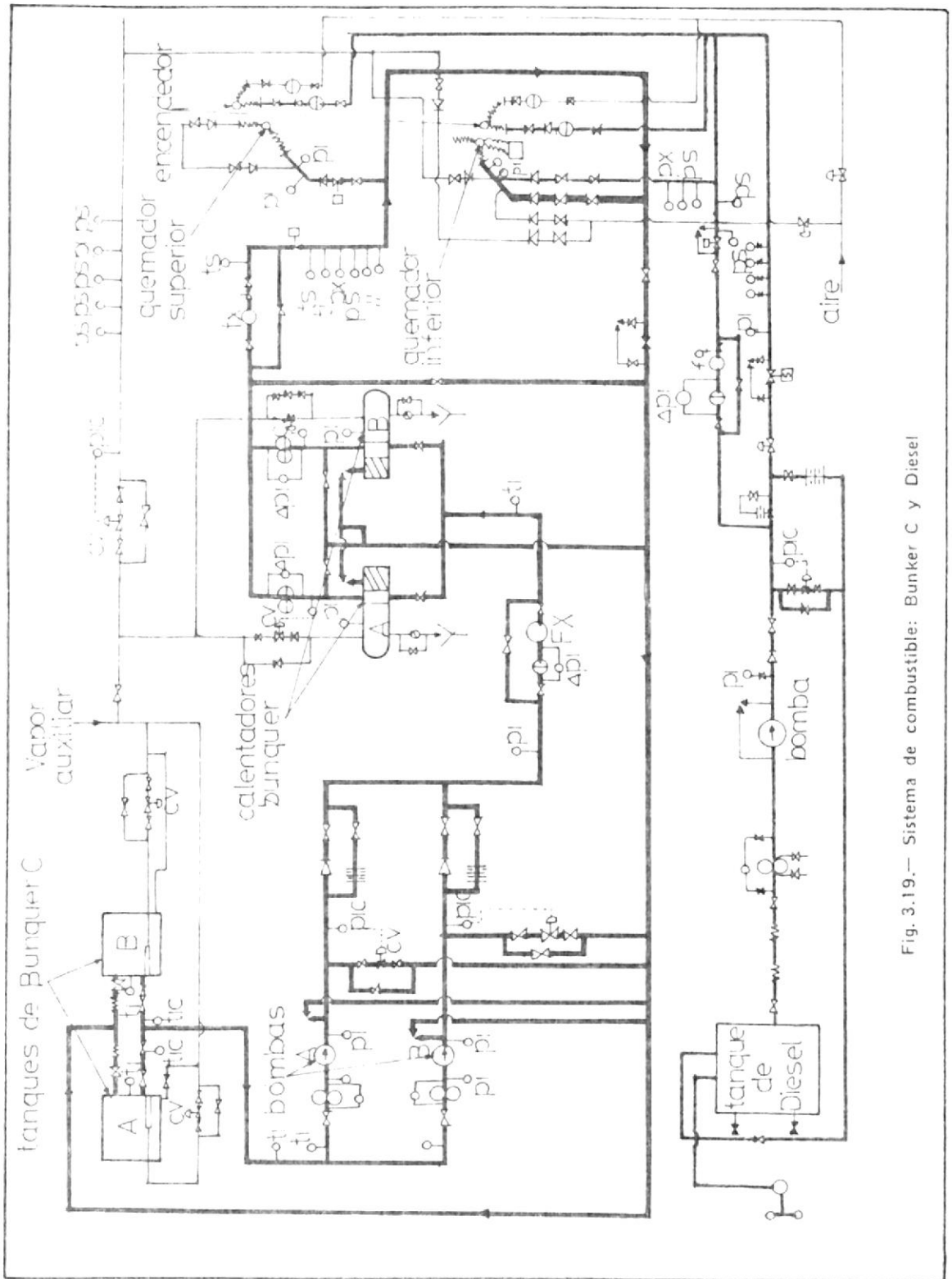


Fig. 3.19.— Sistema de combustible: Bunker C y Diesel

EQUIPO DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE: BUNKER C

<u>TIPO</u>	<u>ATOMIZACION VAPOR M-JET</u>
Número quemadores	6
Capacidad por quemador	4010 Kg/hr
Presión combustible	14 Kg/cm <sup>2</sup> g
Presión combustible a quemadores	7.5 Kg/cm <sup>2</sup> g
Presión vapor atomización	5 Kg/cm <sup>2</sup> g

BOMBA DE COMBUSTIBLE

<u>TIPO</u>	<u>ENGRANE HORIZONTAL</u>
Número	2
Capacidad por bomba	25 m <sup>3</sup> /hr
Presión descarga	20 Kg/cm <sup>2</sup> g
Presión succión	- 0.5 Kg/cm <sup>2</sup> g
Temperatura combustible	40°C
Motor capacidad	37 KW
RPM	1800

CALENTADORES DE COMBUSTIBLE

<u>TIPO</u>	<u>DE TUBOS RECTOS</u>
Número	2
Capacidad	21 T/H
Temperatura entrada	40°C
Temperatura salida	120°C

TANQUES DE SERVICIO DIARIOS

Número	2
Capacidad	570 m <sup>3</sup>

EQUIPO SISTEMA DIESEL (PARA ENCENDIDO)

TIPO	ATOMIZACION VAPOR	ATOMIZACION AIRE O VAPOR
Número Quemadores	3	3
Capacidad por quemador	1880 Kg/hr	1000 Kg/hr
Presión Diesel	10.5 Kg/cm <sup>2</sup> g	10.5 Kg/cm <sup>2</sup> g
Presión aire atomización	5 Kg/cm <sup>2</sup> g	5 Kg/cm <sup>2</sup> g

BOMBA COMBUSTIBLE DIESEL

TIPO	ENGRANE HORIZONTAL
Número	1
Capacidad	9 m <sup>3</sup> /hr
Presión descarga	15 Kg/cm <sup>2</sup> g
Presión succión	- 0.5 Kg/cm <sup>2</sup> g
Motor	11 KW; 1800 RPM

TANQUE DIESEL

Número	1
Capacidad	23 m <sup>3</sup>

EQUIPO IGNICION PILOTO

TIPO	IGNICION ELECTRICA
Número de encendedores	6
Número de gabinete de control	6

VENTILADOR ENCENDIDO QUEMADORES

TIPO	TURBO-VENA-RECTA
Número	1
Volumen	30 m <sup>3</sup> /min
Cabezal Estática	100 mm. WG
MOTOR	
Número	1
Capacidad	1.5 KW
RPM	3600

SISTEMA DE AIRE PARA LA COMBUSTION

Con el propósito de producir la combustión y dar a la Unidad todos los requerimientos de aire necesarios se usa el ventilador de tiro forzado, el cual debe dar el cabezal de presión suficiente para vencer la resistencia que penetran. El calentador de aire a vapor, el calentador de aire regenerativo ó CAR, ductos de aire, caja de aire, etc. Manteniendo de esta manera el tiro a la salida de la chimenea en cero mm. de agua.

El flujo de aire es medido por un venturi doble instalado en el ducto principal de aire, controlándose el flujo de aire que se demanda por la cantidad de combustible. Parte del aire que entrega el ventilador de ti-

ro forzado es precalentado en el CAR, se hace ésto para evitar la corrosión de los elementos de calentamiento ó canastillas del CAR, aunque previamente ese mismo aire ya ha sido calentado por el calentador de aire a vapor, en prevención de la corrosión, como ya se expondrá detalladamente. La corrosión se origina por la presencia de azufre en la composición del combustible, que luego de quemarse da lugar a óxidos como el  $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_3$ , los cuales en contacto con la humedad del aire (si no ha sido previamente calentado) origina el negasto ácido sulfúrico en los puntos de más baja temperatura. De esta manera se puede establecer la temperatura media del metal del extremo frío:

$$\text{Temperat. Media Metal del extremo frío del elemento calentam.} = \frac{\text{Temperatura de salida de gases} + \text{Temperatura de aire entrando al CAR}}{2}$$

La temperatura mínima del CAR tiene que establecerse por análisis químico del combustible, especialmente por el contenido de azufre.

El aire precalentado en el C.A.R. es dirigido hacia los quemadores, caja de aire, por el ducto principal de aire. Parte del aire que va en el ventilador de tiro forzado es utilizado también para los quemadores pilotos, con ayuda del ventilador de sobrealimentación. La pre-

sión entre la caja de aire y quemadores es adecuadamente seleccionada para obtener una buena mezcla de aire-combustible por turbulencia y por consiguiente una buena combustión. Tanto la parte frontal, posterior, paredes laterales, techo absorben calor de los gases de combustión permanentemente, ya que existe evaporación todo el tiempo. Debido a que el ventilador de tiro fuerza de obliga a los gases a salir del hogar, éstos ceden su calor a los supercalentadores por radiación, y luego al pasar por el CAR, comunican su calor al aire que entra por convección, radiación y conducción, por esta razón la temperatura de los gases a la salida decrece gradualmente hasta un valor mínimo cuando salen por la chimenea.

Existen dos mamparas que obligan a los gases de combustión a cambiar la dirección 2 veces a su paso por el banco de tubos, de este modo, cambia su velocidad aumentándola y por consiguiente la razón de transferencia de calor.

Como sistemas auxiliares del sistema de combustión podemos citar:

- el circuito de vapor;
- el circuito de aire de atomización;
- el circuito de purga de quemadores; y;

- el sistema de ignición para iniciar el encendido de los quemadores.

#### CIRCUITO DE VAPOR, AIRE DE ATOMIZACION Y DE PURGA DE QUEMADORES

El vapor de atomización a una presión de  $5.5 \text{ Kg/cm}^2$  se toma de la línea de vapor auxiliar (ver circuito de vapor auxiliar, en fig. 3.20), y se lo introduce por la parte interior del cañón del quemador hacia las pastillas o toberas de atomización.

Este vapor ayuda a pulverizar y atomizar el combustible (en el caso del Diesel, se usa AIRE de atomización), - Bunker C, para una buena y completa combustión.

De la misma línea de vapor se deriva un circuito que se denomina CIRCUITO DE PURGA DE QUEMADORES, el cual tiene por objeto desalojar el combustible remanente y limpiar los conductos de combustible del quemador, cuando éste - sale de servicio.

Al iniciar el encendido de la caldera, no se dispone todavía de vapor de atomización y purga, en este caso y como el encendido se lo hace con Diesel, el vapor es sustituido por el circuito de aire de atomización (derivado de la línea o circuito de aire de planta), lo cual - permite operar con el quemador de Diesel.

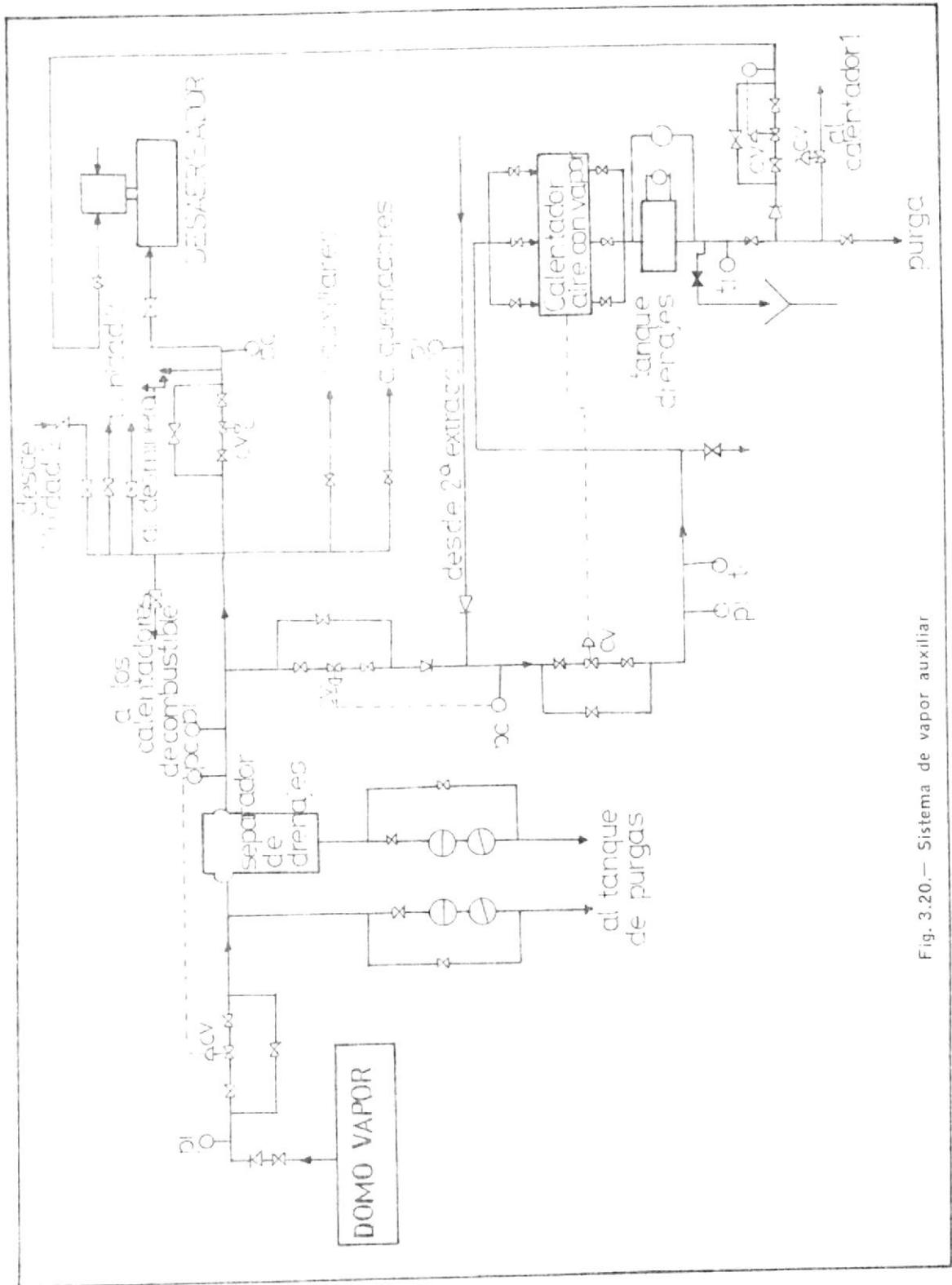


Fig. 3.20.— Sistema de vapor auxiliar

### SISTEMA DE IGNICION PARA INICIAR EL ENCENDIDO DE CAL- DERA

El sistema de ignición consta básicamente de un pequeño quemador adicional que sirve para iniciar el encendido de los quemadores principales.

Una chispa eléctrica proveniente de una bujía provoca el encendido del Diesel oil que sale del quemador de ignición, este fuego a la vez provoca el encendido del combustible del (Bunker C) que sale del quemador principal.

El quemador de ignición está situado dentro del conducto de aire primario. La garganta del quemador consiste de material refractario alrededor de la pared de tubos del hogar. Los tubos son doblados en la zona de cada quemador, para formar la abertura de entrada del combustible y aire hacia el hogar. Este diseño permite la construcción de tubos tangenciales alrededor de las aberturas, reduciendo al mínimo la exposición al fuego de las superficies refractarias.

### NOTAS SOBRE OPERACION DEL EQUIPO DE COMBUSTION

Todos los equipos generadores de vapor, desde la simple caldera de tubos de fuego a los grandes equipos con hogar integral enfriado por agua, sobrecalentador y econo

calentamiento; nunca procurar el arranque con el equipo de combustión en "automático" o con el regulador automático de agua de alimentación funcionando.

La presión manométrica del vapor debe ser revisada tan pronto como exista suficiente presión posible. Primero extinguir la tubería de conexión, entonces chequear la acción de la aguja del manómetro para asegurar su funcionamiento (si se considera que el manómetro se halla a nivel de referencia). Antes de encender un fuego, el operador debe chequear el nivel de agua en la caldera por un soplido bajo la columna de agua y manómetro de vidrio.

Una purga puede servir para liberar el claro del asiento de la válvula de drenaje de alguna materia extraña que pueda encontrarse presente.

Este procedimiento debe ser repetido las veces que se efectúe el calentamiento de una nueva caldera.

Los chequeos de rutina del nivel de agua deberían siempre ser hechos con solo un mínimo cambio en el tiempo en el que la caldera está en operación. Si la acción del agua en el manómetro es lenta cuando la válvula de drenaje es abierta o cerrada, debe investigarse la causa y condición que debe ser corregida inmediatamente.

Asegurarse que un alto nivel no sea llevado justo antes del corte en la caldera.

Durante la operación normal el nivel de agua en el manómetro de vidrio debe ser observado periódicamente - aún cuando la caldera está equipada con un regulador confiable del agua de alimentación y/o indicador remoto de nivel de agua. No es una buena práctica cortar completamente el suministro de alimentación para evaporación aún sólo por un corto período.

Con un exceso en la presión de operación de 400 psi. los manómetros de agua de vidrio liso son a veces usados con inserciones de mica. Para evitar la deterioración de la mica principalmente, las purgas de esos manómetros y columnas es usado con ellos y son restringidos a un mínimo necesario para asegurar al operador la verdadera indicación del nivel de agua.

Normalmente no es necesario purgar con la válvula abierta de par en par. Usualmente, muy despacio la válvula de drenaje de los manómetros y columnas de agua que no tengan inserciones de mica pueden ser drenados sin daño.

Salvo que exista información contraria, el agua puede ser llevada cerca al centro del manómetro de vidrio y

ajustar el nivel en forma gradual. Si el nivel del agua es excesivamente alto, la preparación ocurre, específicamente si la demanda de vapor es alta y fluctuante rápidamente. Si la preparación ocurre, reduce el alto nivel de agua, por purgas libremente y alimentación anual.

Mantener el nivel de agua sólo lo suficiente y tener cuidado de una caída de nivel como consecuencia de una disminución en la demanda de vapor. Reducir la razón de evaporación si es necesario analizar la condición del agua en la caldera con atención en la concentración de la alcalinidad y total de sólidos y examinar la condición del interior del domo cuando la oportunidad es dada.

Al tiempo que la caldera comienza a elevar presión, la disposición se hace para calentamiento gradual y adecuado drenaje de toda la tubería fría. Si la línea principal de vapor está fría, es generalmente aconsejable al levantar presión sobre la línea desde/comenzar abriendo todas las válvulas y by-pass para este propósito.

Si la caldera está destinada para un vapor principal corriente ya en uso, la conexión que se dirige entre la caldera y el cabezal principal debe ser calentada gradualmente con la válvula by-pass por otros medios convenientes. Luego si la válvula está equipada con una vál-

vula de cierre principal de vapor y una válvula automática de no retorno, se abre gradualmente la válvula de cierre, y al tiempo que la presión de la caldera está bajo la presión de la línea, la válvula de vapor de respaldo de la válvula de vapor de no retorno suficiente - para permitir operación automática de la válvula cuando la presión de la caldera es igual a la presión de la línea. Si la caldera está equipada con dos válvulas de cierre instaladas para ser operadas manualmente, abrir gradualmente la válvula cerca al cabezal principal y cuando la presión de la caldera es cercanamente igual a la presión de la línea, abrir lentamente la válvula próxima a la caldera.

Si la caldera es nueva, se vigila particularmente las fugas y ver que la tubería esté libre para expandirse - donde la expansión esté prevista.

Si el calentador está incluido en la instalación y el aceite se esté quemando, vigilar cuidadosamente la temperatura del gas restante del calentador de aire, particularmente en el arranque. Algo anormal y repentino puede indicar que un incendio se esté desarrollando en el CAR (calentador aire) ó en los ductos. Adjuntos al mismo operar siempre los sopladores de hollín en el CAR. Tan pronto como la caldera es sacada de línea o antes,

cada precaución debe ser tomada para mantener limpias las superficies de calentamiento del CAR.

La temperatura del vapor producido en la caldera (ubicada en el domo de vapor) es variable con la carga, sube con el aumento de carga y disminuye con la disminución de la carga.

Con carga constante, la temperatura del vapor sobrecalentado sería anormalmente alta si:

- el exceso de aire es también alto
- la temperatura del agua es muy baja
- el hogar está extremadamente sucio
- ocurre combustión secundaria

La temperatura del vapor es normalmente baja para una carga si:

- el exceso de aire es bajo
- la temperatura del hogar es muy alta
- excesiva humedad es sacada en el vapor (arrastre de agua)
- los tubos del sobrecalentador están sucios por el lado del fuego y/o lado del agua.
- la presión del vapor es muy baja
- la temperatura del medio es normalmente baja.

La temperatura del vapor sobrecalentado cae repentinamente pero se recupera si la caldera se acondiciona.

Las fluctuaciones de temperatura aumentan en frecuencia y severidad del total de sólidos o alcalinidad con el aumento de agua en la caldera.

El sobrecalentador es protegido al momento que lleva car  
na, por una leve interrupción en el flujo de vapor, al abrir la válvula de seguridad del sobrecalentador antes que la válvula de seguridad del domo de caldera si la carga es perdida.

Así, si el flujo de vapor de la caldera es cortado súbi  
tamente, la válvula de seguridad del sobrecalentador se abre y se restablece el flujo de vapor a través del sobrecalentador.

Datos sobre purgas deben ser recordados. Su frecuencia y duración son mejor determinados por un análisis quími  
co del agua de caldera. Puesto que cada planta tiene pro  
blemas propios con el agua de alimentación, personal com  
petente en acondicionamiento de agua debe encargarse de recomendar instrucciones para el soplado. Si ésto no es practicable, el fondo del domo de caldera debe ser purgado mínimo una vez cada 24 horas, o más a menudo si la calidad del agua de alimentación es inferior o la calidad a suplir es grande.

El uso de las válvulas de escape de vapor debe ser restringido a períodos moderados de razón de evaporación y preferiblemente para una razón de combustión baja. Las purgas de fondo deben siempre usarse para liberar sedimentos de la caldera cuando, la caldera es sacada de línea. A menos que las recomendaciones de fabricantes de válvulas sean contrarias, abrir la válvula sellada (próxima a la caldera) y luego soplado de la válvula (más lejana a la caldera) y cierre en orden contrario. Nunca efectuar un purgado demasiado largo para perder el nivel del agua en la columna de vidrio. Chequear las aberturas de las válvulas ocasionalmente. Nunca purgar el agua de las paredes, agua de rejillas, etc. en el tiempo de operación. Esos pueden ser purgados cuando la unidad está fuera de servicio.

Un purgado continuo de línea ofrece los mejores medios para controlar la concentración de sales solubles en el agua de caldera, debido a que se mantiene una relación relativamente constante y mejor transferencia de calor que puede ser aplicado en intercambiadores de calor. Los más serios problemas son debido a escasez de agua.

El operador es responsable por mantener un determinado nivel y no permitir que por descuido o distracción se pierda el nivel adecuado, no confiarse en las alarmas

por alto ó bajo nivel.

Si el nivel de agua cae del nivel de referencia del indicador, alguna falla ha ocurrido en el suministro de agua de alimentación o descuido del operador, excepto en el caso de fluctuaciones momentáneas que de ser posible que ocurran con extraordinarios cambios en la carga, una acción apropiada debe tomarse para extinguir o limitar el fuego.

Cualquier decisión para continuar operando, aún solo por un corto tiempo debe tomarse, ésto puede ser hecho por alguna persona competente, completamente familiarizado con las circunstancias que resulten en caso de emergencia y tal que el nivel de agua pueda ser restaurado inmediatamente sin perjuicio a la caldera, a falta de decisión, considerar:

1. Cortar el suministro de combustible para extinguir el fuego tan rápidamente como sea posible.
2. Simultáneamente, es necesario reducir gradualmente la alimentación de agua (nunca aumentar). Esta alimentación de agua debe hacerse por regulación manual, cerrando la válvula de alimentación completamente cuando la temperatura y ajuste del hogar - fuesen suficientemente bajas.

El propósito del manejo de alimentación de agua, de esta manera es evitar un enfriamiento en las partes a presión con agua relativamente fría, subir el nivel de agua y por otro lado evitar exposición adicional del metal. Un alto flujo de aire a través de la unidad, debe ser usado primero para asegurar el enfriamiento del hogar y ajuste. Toda válvula de salida de vapor debe ser cerrada cuando la razón de evaporación se aproxima a cero.

3. Reducir gradualmente la presión y así como refrescar la caldera, reducir el flujo de aire materialmente. Cerrar todas las puertas y compuertas de tiro para discontinuar algún flujo de aire a través de la unidad tan pronto como se haya enfriado mas allá del punto de peligro.
4. No vaciar en la caldera hasta que el hogar esté suficientemente frío para permitir que un hombre entre. Determine la causa de escasez de agua y examine los posibles efectos de sobrecalentamiento en la caldera tales como grietas y distorsión de las partes a presión antes de poner la unidad en servicio.

### 3.2.1. Productos de combustión: Cenizas, Hollín

La presencia del azufre, casi generalizada en combustibles líquidos de uso doméstico e industrial, en cantidades que oscilan entre el 0.1 al 0.2% en el kerosene; entre el 6-7% en algunos aceites, da lugar durante la combustión a la formación de anhídrido sulfuroso y, en proporciones mucho menores, de anhídrido sulfúrico que, a su vez, puede originar condensaciones de ácido sulfúrico en las zonas donde la temperatura de las superficies metálicas desciende por debajo del punto de rocío. Tales condensaciones, que contienen hasta el 80% de ácido, pueden dar lugar, a causa de reacciones que se desarrollan con mecanismo electroquímico, a una rápida y fuerte corrosión de las superficies metálicas, muy especialmente cuando en los combustibles se hallan presentes, además del azufre, otras impurezas metálicas como hierro, vanadio y sodio.

BEYER  
✓  
La exigencia de rendimientos siempre más elevadas, con temperaturas muy reducidas de los gases en la chimenea, han contribuido a complicar el problema de las corrosiones en las zonas de baja temperatura. El daño que produce la distribución

BEXER  
 / } mermada por las interrupciones en el funcionamiento, relacionadas con las reparaciones de las partes sometidas a corrosión, alcanza valores elevados.

La presencia del ácido sulfúrico ( $\text{SO}_4\text{H}_2$ ) en los gases combustibles, con puntos de rocío tanto más altos cuanto más elevada es la concentración del ácido, está estrechamente vinculada a la cantidad de  $\text{SO}_3$  que se forma durante la combustión.

En las zonas de alta temperatura de los recalentadores, supercalentadores, la corrosión de los tubos, por oxidación del metal, es atribuible a depósitos de productos sólidos de bajo punto de fusión.

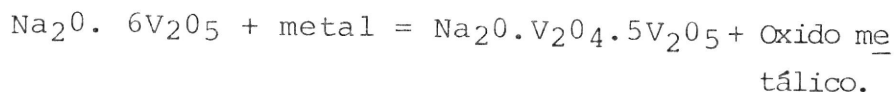
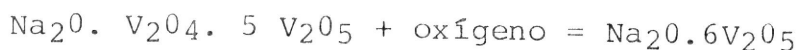
Es notorio que el sodio y el vanadio son los principales responsables del depósito de estos compuestos y de la consiguiente dificultad de flujo para los humos; durante la combustión el vanadio se oxida a  $\text{V}_2\text{O}_5$  (punto de fusión a  $675^\circ\text{C}$ ), mientras que el sodio reacciona con los óxidos de azufre para formar  $\text{SO}_4\text{N}_2$  (punto fusión  $880^\circ\text{C}$ ).

Si la temperatura de superficie metálica es inferior a los puntos de fusión mencionados, los dos

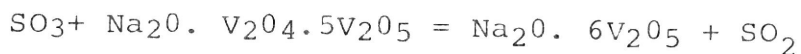
compuestos citados no reaccionan; a temperaturas más altas se forma  $\text{SO}_2$  más el compuesto  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_4 \cdot 5\text{V}_2\text{O}_5$  (punto de fusión  $625^\circ\text{C}$ ) que constituye el producto principal contenido en las incrustaciones que se forman en los recalentadores o/y supercalentadores de las calderas a tubos de agua, como es nuestro caso.

Los fenómenos de corrosión provocados por este compuesto se producen mediante dos distintos procesos:

a) con aire



b) con aire y en presencia de  $\text{SO}_2$



#### INFLUENCIA DEL EXCESO DE AIRE EN LA FORMACION DEL ANHIDRIDO SULFURICO

Empleando excesos de aire más bajos, se provoca inevitablemente la presencia de partículas no quemadas en los humos; las llamas, además, resultan más alargadas que las que se obtienen con los ex-

cesos de aire normales.

A fin de controlar la combustión, en condiciones próximas a las estequiométricas, es preciso disponer de equipos muy sensibles: cromatografías - para los análisis continuos de los humos, pirómetros de aspiración para el control final de la temperatura, equipos para la medición del punto de rocío ácido y del contenido de sólidos en los humos, etc. y lo más importante, de personal muy especializado, capaz de efectuar correctamente las distintas mediciones y de dar la máxima garantía a los resultados obtenidos.

Bunr, Niepenberg y Rendle, en un estudio sobre las características de los aceites combustibles y de los humos que se originan durante la combustión de estos productos, aportan las siguientes observaciones:

a) el contenido de  $SO_3$ , el tipo de máxima corrosión y el punto de rocío disminuyen con la reducción del exceso de oxígeno; en condiciones estequiométricas no se forma  $SO_3$  ni se tienen los puntos de rocío ácidos.

b) la disminución del punto de rocío ácido es si-

multánea con la disminución del contenido de  $\text{SO}_3$  en el gas.

- c) el contenido de  $\text{SO}_3$ , el tipo de máxima corrosión y el punto de rocío aumentan con la carga de la caldera (y de la cámara de combustión) a igualdad de contenido de oxígeno.
- d) el contenido de  $\text{SO}_3$ , a exceso de aire constante, no es directamente proporcional al contenido de azufre en el combustible; con bajos excesos de aire las diferencias de contenido en azufre tienen efectos despreciables.
- e) la cantidad de sólidos presentes en los gases de combustión aumenta con la disminución del contenido de oxígeno; a niveles de  $\text{O}_2$  inferiores al 0.2% el crecimiento se produce rápidamente.
- f) los aceites combustibles muy sulfurados se pueden quemar, con efectos de corrosión casi nulos, empleando quemadores de concepción moderna, aptos para quemar el aceite con limitadísimos excesos de aire.

#### 3.2.1.A. Cálculo real de los productos de combustión (Bunker C)

Exceso de aire = 4.5%

$$\text{CO}_2: 15.05\% \quad \text{O}_2: 1.1\% \quad \text{N}_2: 83.85\%$$

$$\text{CO}_2: 0.1505 \frac{\text{Kmol CO}_2}{\text{K mol gas}} \times 44 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{Kmol CO}_2} = 6.62 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{K mol gas}}$$

$$\text{O}_2: 0.011 \frac{\text{Kmol O}_2}{\text{Kmol gas}} \times 32 \frac{\text{Kg O}_2}{\text{Kmol O}_2} = 0.35 \frac{\text{Kg O}_2}{\text{K mol gas}}$$

$$\text{N}_2: 0.8385 \frac{\text{K mol N}_2}{\text{K mol gas}} \times 28 \frac{\text{Kg N}_2}{\text{K mol N}_2} = \frac{23.48 \frac{\text{Kg N}_2}{\text{Kmol gas}}}{30.45 \frac{\text{Kg gas seco}}{\text{K mol gas}}}$$

$$0.1505 \frac{\text{K mol C}}{\text{K mol gas}} \times 12 \frac{\text{Kg C}}{\text{K mol C}} = 1.81$$

Por tanto

$$\frac{30.45 \frac{\text{Kg gas seco}}{\text{K mol gas}}}{1.81 \frac{\text{Kg C}}{\text{K mol gas}}} = 16.86 \frac{\text{Kg gas seco}}{\text{Kg C en gas seco}}$$

Luego:

$$16.86 \frac{\text{Kg gas seco}}{\text{Kg C en gas seco}} \times 0.8666 \frac{\text{Kg C en combust.}}{\text{Kg combustible}}$$

$$= 14.61 \frac{\text{Kg gas seco}}{\text{Kg combustible}}$$

TABLA 3.3

PRODUCTOS REALES DE COMBUSTION DEL BUNKER C

MW	EA(%)	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	<u>Kg gas seco</u>	<u>Kg combust.</u>	<u>Kg gas seco</u>
					Kg combustible	hr	hora
73	3	15.28	0.8	83.92	14.4	17800	256320
	4.5	15.05	1.1	83.85	14.61		260058
	7.2	14.67	1.55	83.78	14.97	14000	209580
55	10	14.29	2	83.71	15.35		214900
	17.5	13.32	3.3	83.38	16.41	9400	154254
36	22	12.86	4	83.14	16.97		159518
	77	12.12	9.5	78.38	18.07	5300	95771

### 3.2.2. Evacuación de los productos de combustión

La escoria se forma, algunas veces, directamente encima o abajo de los quemadores, interfiriendo con su correcta operación; es conveniente que los quemadores sean inspeccionados continua y periódicamente, asegurándose de que operen correctamente. Cualquier acumulación de escoria debe ser removida, teniendo cuidado de no dañar las superficies del refractario o ya sea el quemador mismo, ésto es, su tobera o "pastilla" atomizadora. Una vez en la semana se acostumbra en la planta a hacer una limpieza completa a los quemadores de cada unidad, para lo cual se ha elegido la hora en la que hay menor demanda de energía, ésta es, en la madrugada de cada lunes, permitiendo a la unidad operar a baja carga, a fin de que los depósitos se enfríen y puedan ser raspados con facilidad. La cantidad y localización de los depósitos de escoria, dependen, a veces, de varios factores tales como el tipo de pared del hogar, la temperatura de fusión de la ceniza, el régimen de liberación de calor del hogar, el ajuste de los quemadores, el porcentaje de aire de exceso y muchos otros más. La formación de escoria en las

paredes del hogar o en las pantallas en la salida de los gases del hogar, llega en ocasiones a ser muy dañina si los tubos se encuentran casi completamente cubiertos, haciendo que la circulación del agua se torne muy lenta, mientras que una pequeña sección del tubo esté limpia y ex-puesta a un severo calentamiento. Como consecuen-cia de la circulación defectuosa, se puede llegar a experimentar sobrecalentamientos y daños a la parte del tubo expuesta al calor. La baja absor-ción del calor en el hogar como resultado de los depósitos de escoria significará que los gases - que entran al sobrecalentador, estén demasiado calientes con lo que la temperatura del vapor se rá excesiva.

Son generalmente efectivos para la limpieza de los tubos en la salida del hogar o en la entra-da del sobrecalentador el uso de sopladores re-tráctiles apropiados, tal como se tiene en la planta. Mientras que en las partes más "frías" de la caldera es más satisfactorio y económico usar sopladores de hollín tipo rotatorios, en los cuales, el ajuste radial de la zona es barrido, así como el desplazamiento axial, deberán ser

cuidadosamente verificados en cada inspección a la caldera para evitar daños a los tubos y a las pantallas deflectoras.

Los elementos que no están en operación llegan a adquirir una temperatura mayor que la de las partes de la caldera, por lo que su dilatación es mayor afectándose así la posición relativa de las toberas con respecto a las partes de la caldera y los tubos. La ceniza impulsada por el chorro de vapor o aire, puede llegar a perforar un tubo. La presión usada en el soplador puede ser variada por medio de un orificio del tamaño apropiado en la línea de suministro de vapor. La presión adecuada para alimentar un soplador deberá ser una función de la efectividad con que trabaje. El precalentador de aire regenerativo también posee, como ya se ha dicho, un soplador de hollín, principalmente, para mantener la caída de presión a través de su cuerpo en un rango razonable. Los depósitos sobre la superficie de este tipo de calentador tiene muy poco efecto sobre el intercambiador de calor, y, por lo general, el uso de un soplador de tipo rotatorio como el que posee la unidad, es muy

efectivo, de tal forma que cubra por completo la superficie del calentador y que sople en el sentido del movimiento del flujo de gases de escape.

Al soplar el hollín o las escorias, es deseable hacerlo teniendo un considerable flujo de aire a través de la caldera, con el fin de que el polvo, hollín y ceniza, sean arrastradas sin que puedan formar una mezcla explosiva. Al iniciar el proceso de soplado los quemadores deben ajustarse para una operación estable y el tiro de caldera y suministro de aire deberá incrementarse ligeramente para evitar la posibilidad de ahogar los fuegos o soplar hacia el cuarto de calderas a través de los quemadores al operar los sopladores. La secuencia apropiada para soplar, consiste en empezar la limpieza por la caldera y seguir el trayecto del flujo de gases para evitar que el material desprendido al principio vuelva a depositarse en las partes ya limpias. El vapor que se usa en el soplado debe ser seco y de preferencia ligeramente sobrecalentado; las líneas de vapor deben purgarse completamente, antes de soplar para evitar que la humedad se combine con el hollín formando depósitos sobre las superficies de calefacción.

Se han experimentado algunos resultados favorables mediante la admisión en el hogar de mezclas de cal, carbonato de calcio y otras mezclas que son usadas con el combustible o introducidos por soplado separadamente. De acuerdo con los reportes, los depósitos de escoria y cenizas, cuando se usan las mezclas anteriores, son más suaves y pueden desprenderse más fácilmente. La práctica de blanquear el interior de la caldera con una lechada de cal, después del lavado se ha encontrado beneficioso al disminuir los depósitos en las partes más frías del generador de vapor.

Los depósitos en las superficies de la caldera se pueden aflojar, frecuentemente, mediante el uso de vapor ó chorros de agua aunque debe tenerse cuidado para evitar que el refractario ó el aislamiento térmico se moje demasiado.

Una temperatura alta de los gases de combustión a la salida de la chimenea indican que es necesario hacer uso de los sopladores de hollín; el uso de estos elementos se ha regularizado de tal manera que efectúan su cometido cada 8 horas, ya que se encuentra más dificultad en el uso efectivo de los sopladores si por descuido se de

ja de hacerlo ya que una considerable cantidad de hollín se deposita en la estructura.

### 3.3. MANTENIMIENTO Y LIMPIEZA DEL EQUIPO

Para una buena operación, de tal manera que exista una transferencia de calor máxima es necesario que las distintas superficies y los diferentes componentes del hogar se hallen limpios. Como ya se ha visto en secciones anteriores, es importante cumplir con el programa regular de soplado de hollín, tanto en el hogar como en el precalentador de aire regenerativo.

A más de las observaciones hechas sobre operación y mantenimiento de equipos, a continuación se harán otras precauciones a tomarse respecto a este tema:

#### 3.3.1. Caldera: Purgas y golpe de llama

Reglas generales para el purgado bajo de caldera no pueden ser hechas. Ya que, depende mucho sobre todo del carácter del agua, la naturaleza del tratamiento del agua de alimentación, el diseño de caldera y la carga que es llevada por ésta. La cantidad y frecuencia de purgas podrían ser gobernadas por las condiciones de concentración del agua de caldera.

El uso continuo de las purgas hace posible tener el control adecuado de agua de alimentación de caldera, pero puede ser mantenido con el uso de purgas intermitentes. Si el agua de alimentación tiene una alta cantidad de sólidos y la carga es importante o pueden ocurrir fluctuaciones rápidamente, la frecuencia de purgas de caldera debe ser regulada para que la concentración de materia suspendida y sólidos disueltos se mantenga bajo ciertos límites. En el caso de no haberse especificado las condiciones para una instalación tal como el total de sólidos disueltos, alcalinidad, etc. ésto es ignorado o excedido. La frecuencia y cantidad de purgas podría estar en concordancia con instrucciones dadas por un químico, como se lo hace actualmente en la planta.

En la operación del hogar integral enfriado por agua debe tenerse cuidado de que excesivos golpes de las llamas sobre los tubos no ocurran.

La observación del patrón y viaje de la llama podría ser hecha regularmente por los operadores, y la distribución de llama podría ser controlada para que resulten un mínimo de choques.

MANTENIMIENTO DEL HOGAR

Las inspecciones de rutina de las paredes del hogar, domos y supercalentadores podría ser hecha cada vez después de la salida de caldera, - limpieza inicial, limpieza de rutina con ácido y durante salidas anuales. En esas inspecciones los domos podrían ser abiertos y las placas de agujeros de los supercalentadores removidas, la condición interna de los domos podría ser chequeada y las superficies internas de los domos podrían ser inspeccionadas de depósitos. Los tubos podrían ser chequeados por si hubiere defectos y los extremos de los tubos inspeccionados internamente por si hubiere depósitos. Algunos depósitos podrían ser removidos de domos y supercalentadores y los tubos limpiados con agua. Los tubos del hogar podrían ser examinados externamente por ampollamiento, corrosión, agrietamiento, quemazón, etc. Para este propósito los tubos del hogar del lado del fuego deben ser primero limpiados minimizándolos de escoria y depósitos de cenizas, es decir, eliminando el hollín. Las inspecciones deben ser hechas por personas competentes, en forma paciente y minucio-

sa, de tal forma que juzguen la condición de los depósitos, etc. Un registro de cada inspección - podría ser mantenido de una manera uniforme para que los resultados de algunos cambios puedan ser comparados con condiciones anteriores.

Si las inspecciones realizadas en turnos de operación, dan como resultado fallas o aún más condiciones esperadas que conducen a fallas, si la causa de la condición no es obvia o no puede ser determinada claramente, tales inspecciones podrían ser exámenes metalúrgicos de secciones de tubos, análisis y químicos de depósitos, etc.

#### FORMACION DE DEPOSITOS EN LOS TUBOS DE AGUA

Dado que las altas velocidades de transferencia de calor en el agua son extremadamente altas y desde que este tipo de superficie de calentamiento es expuesto por largos períodos de tiempo a las altas temperaturas del hogar del orden de los 1650°C, es esencial mantener los tubos libres de depósitos.

El tratamiento del agua de alimentación es dirigida a eliminar la formación de depósitos y eli

minar por reacciones químicas la formación de éstos, pero a no ser que el control sea mantenido sobre los procesos y chequeos frecuentemente efectuados por químicos calificados, no hay certeza que los resultados deseados sean continuamente logrados. El tratamiento del sistema de agua de alimentación se logra mediante un balance químico de por lo menos una semana, ya que ésto es necesario para que los depósitos en los tubos del hogar suban a un nivel en el lado caliente y que ocurra una falla en el punto del depósito. Una película de un espesor de 0.01" de cierta clase en depósitos de caldera pueden llegar en el lado de alta temperatura. Por lo tanto la formación de depósitos debe ser mantenida baja con un adecuado tratamiento de agua. En muchos casos puede ser necesario corregir excesiva formación de depósitos por medio de un procedimiento de limpieza con ácido.

#### REPARACION DE TUBOS

La sección de un tubo el cual ha fallado o que debe ser reemplazado a causa de peligro de falla, puede en la mayoría de los casos ser cam-

biado después de remover las paredes del hogar que han estado funcionando con falla, la sección de los tubos es removida cortando la sección transversal del tubo sin riesgo sobre y bajo de la falla y área imperfecta del tubo. Antes de insertar y soldar nuevamente una sección, los extremos del tubo podrían ser separados adecuadamente.

### 3.3.2. Mantenimiento y limpieza de los supercalentadores

Mientras exista fuego en el hogar, debe proveerse adecuada protección de los elementos del supercalentador, ésto es especialmente importante durante períodos en que no haya demanda de vapor, tales como en el arranque y cuando sale de línea la unidad.

En muchos casos las consideraciones de protección del supercalentador son el control de los factores que determinan cuan rápidamente una unidad de este tipo podría ser llevada a una presión superior. Los elementos del supercalentador deben ser calentados uniformemente y la temperatura del gas que entra no debe ser tan alta pa-

ra proteger los elementos del supercalentador.

Una válvula de seguridad en la tubería de vapor principal, se abre por debajo de la válvula de seguridad del domo dando así otro medio de protección asegurando un flujo a través del supercalentador, si la demanda de vapor cae repentinamente.

Las superficies externas del supercalentador pueden ser inspeccionadas regularmente para limpieza. Las cenizas deben mantenerse a un mínimo por el uso adecuado de los sopladores de hollín. Los extremos de la estructura deben ser entonces removidos inmediatamente. El propio tratamiento de agua y control de calidad del vapor y remanente son esenciales para asegurar la limpieza de las superficies interiores del supercalentador. Las sobrecargas, fluctuaciones de carga, alto nivel de agua, espuma, altas concentraciones, etc. contribuye a sedimentaciones en la superficie interior.

La acumulación de esos depósitos dentro de los tubos conduce a fallas de la unidad. Chequeos periódicos de las caídas de presión de vapor a través

del supercalentador, bajo condiciones idénticas de carga, usualmente indican si existen o no de pósitos de sólidos dentro de los elementos.

En el caso de falla de uno o más elementos, se debe chequear cuidadosamente a fin de determinar la causa. Una inspección regular y mantenimiento programado puede asegurar continuidad de servicio y evitar serios problemas y caras salidas de línea, se recomienda hacer:

- El supercalentador se debe inspeccionar al salir de servicio de caldera (ya sea el primario o el secundario).
- Chequear la alineación de los elementos y alguna evidencia de alabeo, hinchamiento o pandeo, reemplazando la tubería que evidencia calentamiento.
- Chequear los soportes, espaciadores y placas de sellos, su localización y condición. Reparando rápidamente.

Las condiciones deben ser tales, que un adecuado flujo de vapor pase a través del supercalentador en el arranque. Las válvulas de drenaje de salida del colector y/o de la línea princi-

pal de vapor son abiertas antes de que la unidad sea encendida y mantenidas abiertas para evaporación o bajas cargas.

Es esencial que arreglos adecuados sean hechos - para asegurar la limpieza de las superficies externa e interna del supercalentador todo el tiempo. La acumulación de escoria es el resultado de una desigual distribución del gas, mala transferencia del calor y posibles localizaciones de sobrecalentamiento.

La regular utilización de los sopladores de ho llín, proveen medios seguros para mantener las superficies externas limpias.

### 3.3.3. Mantenimiento y limpieza de los quemadores

Es de vital importancia que todas las partes que componen el sistema de quemadores permanezcan limpias y en condiciones satisfactorias para realizar la operación adecuada a fin de lograr una combustión lo más completa posible. Es necesario hacer revisiones periódicas ya en las toberas ó "pastillas" atomizadoras como también en la garganta de la abertura.

Los ajustes para permitir el libre movimiento del anillo-regulador y aletas puede realizarse de la siguiente manera:

- Existen 2 pernos alrededor de la placa frontal del quemador soportando el aro, estos pernos sirven de soporte y a la vez de pivote para las aletas, las 2 tuercas fijadas en estos pernos, que sostienen la placa frontal con el anillo de las aletas deben ajustarse para permitir un juego de 1/8" en el extremo de las aletas.
- El tornillo de operación de las aletas, el cual es parte del mecanismo de ajuste de las aletas, localizado en el frente del quemador, debe lubricarse con una pequeña cantidad de grasa para alta temperatura: Molykote.
- El anillo regulador de entrada de aire es operado por tres manijas, fijadas en tres ejes roscados y localizados a 120° uno con respecto del otro, las partes roscadas lubricarse dos veces al año, con una pequeña cantidad de grasa para alta temperatura llamada Molykote. Cuando se desmonta un quemador completamente, las partes deben limpiarse y repintarse con pintura de aluminio para antes de reensamblar.

## CAPITULO IV

### USO DEL GAS NATURAL COMO COMBUSTIBLE

#### 4.1. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE GAS NATURAL

El Gas Natural del Golfo de Guayaqui, estará en producción a partir aproximadamente del año 1985. El suministro a los lugares de consumo se lo hará a través de un gasoducto.

El gas necesita de un mínimo de equipo, pues se recibe en gasoducto y no se almacena en la planta. Las líneas de suministro de gas combustible, son propiedad de la compañía que lo suministra, en este caso la Corporación Estatal Petrolera Ecuatoriana (CEPE); estas líneas deben ser bien drenadas con separadores para que el condensado no se acumule y no interfiera el flujo de gas o arrastre de materias extrañas, ya que afectan la operación de los quemadores. Las líneas de suministro deben ser de un tamaño adecuado para el flujo máximo que se desea fluir sin demasiada caída de presión; en algunos casos se instalan tanques separadores de la línea que llega a la planta, lo cual es aconsejable, ya que evitarán la suciedad o partículas de condensado que pueden ser llevadas por el gas; el mejor medio para remover el líquido acumulado en el tanque separador es una tram-

pa o purga operada manualmente. El equipo de medición del gas, e instalación será propiedad de la compañía de gas, aunque la estación de medición debe ser localizada en los terrenos de la planta. Se pueden usar medidores del tipo de orificio, debiendo tener dos o más tuberías en paralelo con orificios para mayor flexibilidad y exactitud dentro del rango de medición; los orificios para dar más flexibilidad, son diseñados para la presión del gas, temperatura y gravedad específica de acuerdo con estándares de medición. Los instrumentos que registran la diferencial en el orificio estarán dados en mm. de agua, se instalarán también registradores de presión de gas y temperatura en cada estación de medición, se construirá una caseta o un alojamiento que proteja contra las lluvias a este equipo. Donde el gas está sujeto a considerables variaciones de calidad, deben instalarse registradores para gravedad específica y poder calorífico.

Los operadores destinados a estos equipos deben usualmente cambiar las gráficas de los medidores, revisar el equipo en operación y poner o quitar de servicio a los medidores, según sea necesario, reportando al ingeniero supervisor cualquier daño para su corrección y mantenimiento. Las gráficas del gas serán integradas por planímetro, y el gas consumido será calculado por el operador, deter-

minando diariamente el consumo de calor y comparándolo con los reportes de la compañía de gas, estas gráficas serán enviadas a la compañía de gas, para que sean recalculadas y cobradas; las gráficas para los medidores de gas son elaboradas para 24 horas.

Las estaciones reductoras de presión son también propiedad de CEPE, pero deben estar vigiladas por el operador de la planta con el objeto de que vea y constate de que se tiene una presión adecuada para un buen control de combustión y quemadores. La buena operación de los quemadores depende de una correcta y continua operación de las estaciones reductoras. Las válvulas pueden ser del tipo de disco balanceadas y controladas por la operación de un diafragma operado por el gas. Se usa además una válvula piloto actuada por presión en el lado inferior de la válvula, admitiendo gas de la línea principal según se necesite, al diafragma que opera la válvula principal de control. Si la presión del gas baja a menos de una tercera parte de la presión de entrada, es necesario colocar dos o más válvulas reductoras en serie, esto da un mejor control de presión y menor vibración, así como congelación, debido al enfriamiento excesivo del gas por una rápida expansión. Es de considerar también la necesi

dad de usar medios de calentamiento exterior en las válvulas reductoras o ligero precalentamiento del gas antes de la expansión para evitar presiones erróneas antes del congelamiento. Para una mejor regulación de presión, existen juegos de dos o más válvulas reductoras en paralelo, de tal manera que las válvulas en servicio puedan variarse para permitir operación a varios rangos de flujo. Los operadores deben cortar las válvulas reductoras de entrada y salida en cargas variables.

Informaciones facilitadas por CEPE, se sabe que el gas estará disponible en la planta a 600 psig ( $42.19 \text{ Kg/cm}^2$ ) ya que es necesario que esta presión se mantenga suficientemente arriba de la presión del cabezal de gas de la planta, para que todo el gas fluya, si es posible, con algún margen, manteniendo la válvula abierta para control de presión. La presión del gas en el cabezal de la planta será de  $3.4 - 3.5 \text{ Kg/cm}^2$ , debiendo permanecer constante en todas las cargas, de tal forma que trabaje correctamente el sistema de quemadores, y en general el sistema de combustión, además de tener precisos en los medidores de flujo y el control de combustión. Esta presión de gas también ayudará para el control manual de combustión.

Las casetas para la protección de la estación reductora

y del equipo de medición, deberán estar bien ventiladas debido a las fugas que existan. Para reducir la posibilidad de una explosión, se usarán interruptores y lámparas a prueba de explosión y no se permitirá fumar.

PARAMETROS IMPORTANTES PARA EL MANIPULEO DEL GAS

Peso molecular: 16.32 Kg/kg mol  
 Presión crítica: 45.76 atm = 672.62 psi.  
 Temperatura crítica: 192.2 °K = 346.5°R

CONDICIONES EN LA SUPERFICIE DEL POZO EN PRODUCCION

$$T = 20^{\circ}\text{C} = 293^{\circ}\text{K}$$

$$p = 3000 \text{ psi} = 204.06 \text{ atm (Datos proporcionados por CEPE)}$$

$$R = 0.082 \frac{\text{atm m}^3}{\text{K mol } ^{\circ}\text{K}}$$

$$\text{presión reducida: } p_r = \frac{204.08}{45.76} = 4.46$$

$$\text{temperat. reducida: } t_r = \frac{293}{192.2} = 1.52$$

con estos datos, observando la fig. A.6 encontramos:

$$Z = 0.83$$

$$V = \frac{ZRT}{P} = \frac{0.83 \times 0.082 \frac{\text{atm m}^3}{\text{Kg mol } ^{\circ}\text{K}} \times 293^{\circ}\text{K}}{(1 + 204.08) \text{ atm} \times 16.32 \text{ Kg/kg mol}}$$

$$\rho = \frac{1}{V}$$

$$\rho = 167.84 \text{ Kg/m}^3$$

CONDICIONES EN EL GASODUCTO DE LLEGADA A LA PLANTA

$$T = 20^{\circ}\text{C} = 293^{\circ}\text{K} \quad p_r = 0.89$$

$$p = 600 \text{ psi} = 40.82 \text{ atm g} \quad t_r = 1.52 \text{ y en la fig. A.6}$$

$$Z = 0.93$$

$$V = \frac{0.93 \times 0.082 \times 293}{(1.00 + 40.82) \times 16.32} \quad \rho = 30.54 \text{ Kg/m}^3$$

CONDICIONES EN LA TUBERIA HACIA EL HOGAR

Considerando que la presión en el cabezal de quemadores a gas ha sido prácticamente estandarizado en un rango - de 30 a 50 psi. por la mayoría de los fabricantes, y de acuerdo con las especificaciones y condiciones del hogar para esta planta se ha aceptado 50 psi como la más apropiada, razón por la que en base a esta consideración, se hacen los cálculos.

$$T = 20^{\circ}\text{C} = 293^{\circ}\text{K}$$

$$p = 50 \text{ psi} = 3.52 \text{ Kg/cm}^2\text{g} = 3.4 \text{ atm g} = 4.4 \text{ atm.}$$

$$p_r = 0.07$$

$$t_r = 1.52$$

con estos datos y en la fig. A.6 hallamos:

$$Z = 0.98$$

$$V = \frac{0.98 \times 0.082 \times 293}{(1 + 3.40) \times 16.32} \quad \rho = 3.05 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

## 4.2. REDISEÑO DEL SISTEMA DE COMBUSTION

El sistema de combustión en cuanto se refiere al funcionamiento de los equipos que lo componen, se mantendrá inalterado, esto es, el calentador de aire regenerativo y el calentador de aire a vapor funcionará a los mismos regímenes que en el caso del anterior combustible ya visto. En lo que respecta al ventilador de tiro forzado, será necesario un leve cambio, que no afecta mayormente su régimen de trabajo, mientras que en el caso de los sopladores de hollín, su uso se verá limitado como lo veremos más adelante. El equipo que maneja el aire para la combustión, en general, tendrá unas pequeñas variaciones debido a la distinta cantidad de aire necesaria para efectuar la combustión del Gas Natural, variaciones que no son sustanciales en el funcionamiento en general de todo el sistema, es decir, en la filosofía de operación.

En el calentador de aire regenerativo se podrían hacer algunas modificaciones en su funcionamiento, lo que es materia de elaboración de una nueva tesis, quedando al mejor criterio del interesado.

### 4.2.1. Sistema de combustible: Gas Natural

Quando se usa gas natural como la fuente principal de combustible de caldera, una vez que la

planta ha entrado en operación es necesario asegurarse de que el suministro sea constante, así como la presión de llegada del gas. Claro está que esto depende, en gran parte, del proveedor del gas, CEPE, y debe ser inmediatamente notificado en caso que la presión descienda de una manera anormal. Cuando el suministro de gas está sujeto a posibles interrupciones, al observar que la presión desciende anormalmente, debe indicarle al operador de caldera que es tiempo de alistar los quemadores de Bunker C.

Los tramos de tubería usados para la medida del flujo de gas se instalarán por duplicado, como se estila en la planta de acuerdo al fabricante, y se tendrá una capacidad de medición de acuerdo con el flujo de gas que deberá usarse a fin de mantener una medición exacta.

El gas suministrado a la planta con  $42.19 \text{ Kg/cm}^2\text{g}$  se lo reduce a la presión requerida por el cabezal de suministro a quemadores alrededor de  $2.11 - 3.52 \text{ Kg/cm}^2\text{g}$  en estaciones reductoras de presión, tales estaciones deberán revisarse periódicamente para asegurarse de que no existan fugas de gas y que las válvulas reductoras operan uni-

formemente, manteniendo una presión constante en el cabezal de alimentación a quemadores.

Es práctica general el instalar alarmas de alta y baja presión en el sistema de gas combustible, - principalmente en las estaciones reductoras para avisar la existencia de alguna condición anormal en el suministro de gas. Una caída de presión muy alta puede causar que las válvulas se peguen y congelen, por lo que es aconsejable instalar los medios necesarios para calentar las válvulas. También es conveniente instalar trampas que purguen el condensado que se junte en los puntos más bajos de la tubería de gas, asegurándose de que estas trampas se inspeccionen en forma regular.

#### 4.2.2. Sistema de quemadores

*Gas natural*

El Gas natural es un combustible ideal en un sistema de quemadores, ya que para su utilización - no requiere preparación a fin de obtener una rápida e íntima mezcla con el flujo de aire de combustión a través de la garganta del quemador. Sin embargo estas características de fácil y rápido encendido no permiten descuidos al operador ya que acarrearían peligros potenciales de explo-

sión. Además, se deben guardar otras precauciones, ya que la flama en muchos tipos de gas alcanza poca luminosidad por lo que a veces resulta difícil verla en el hogar, otra es que la acumulación del gas sin quemarse como resultado de fugas dentro del hogar, ó por pérdida de fuego en los quemadores no lo hace visible lo cual es un serio peligro de explosión.

El poder calorífico inferior del Gas natural del Golfo de Guayaquil (pozo AMISTAD N° 1) es de 8211 Kcal/m<sup>3</sup>. Las características del gas natural incluyen la velocidad de propagación de la llama y la temperatura de ignición, lo cual puede variar ampliamente por lo que se hace necesario conocer estos valores para el diseño del quemador, obteniéndose flama estable en él, que dé una combustión completa sin excesivo calentamiento de la parte del quemador que descarga en el hogar. Los quemadores de gas existen de muy diversos tipos, pero en general, ayudan a mezclar el gas natural y el aire íntimamente, es decir, tratar que el gas se queme completamente, antes de llegar a las paredes "frías" del hogar.

El propósito de la mayoría de los quemadores es

de transformar el gas que contienen en calor utili  
zable para ser absorbido por un objeto (agua de a-  
limentación). En general un quemador debe tener -  
las siguientes características.

1. Ser controlable sobre un amplio rango de carga  
de trabajo sin retroceder o pararse, principal-  
mente aplicable a los regímenes de gas y manual  
mente controlable desde el panel de mando de queu  
madores.
2. Proveer uniforme distribución de calor sobre el  
área calentada.
3. Ser capaz de quemar completamente el gas,
4. No provocar levantamiento de llama en el trayecu  
to desde las lumbreras.
5. Proveer de encendido rápido con llama móvil de  
lumbrera a lumbrera sobre la entrada del quemau  
dor rápida y positivamente.
6. Operar normal y establemente durante el encendiu  
do, quemado y extinción, y;
7. Poseer construcción sustancial para soportar diu  
versidad de calentamiento y enfriamiento.

Estos requerimientos deben estar bajo una amplia

variedad de condiciones de servicio, ya que diferencias en la composición del gas y cambios en la presión y gravedad específica no podrían prevenir operación satisfactoria.

Para operar con seguridad, el sistema de encendido de un quemador a gas se debe mantener cerrado en todas las partes de la pared del quemador a la capacidad total de presión de gas permisible, no solamente con flujo de aire normal, pero también con mucho más flujo de aire a través del quemador que el teóricamente requerido. Idealmente debería ser posible a mínima carga el paso de la carga total del flujo de aire a través del quemador, y a máxima carga como mucho un 25% de exceso de aire teórico sin pérdidas de encendido. Con esta difusión en el flujo de aire no es probable que el encendido pueda ser perdido, aún momentáneamente, durante algún contratiempo en el flujo de aire debido a operación improcedente o a errores.

La velocidad del gas que sale de los quemadores debe mantenerse dentro de los límites más estrechos, pues se corre el peligro de que la flama se regrese dañando al quemador si la velocidad es de

masiado baja. Si la velocidad es demasiado alta la flama puede ser inestable, existiendo un peligro de explosión.

Hay bastantes cambios en la velocidad de ignición de los diferentes gases, y este factor debe particularmente considerarse en gases de baja presión y tomarse en cuenta en el diseño y operación de los quemadores de gas. La tubería de gas y los ductos de suministro de aire deben construirse para dar distribución de gas y aire balanceado para cada quemador. Los cabezales de gas a quemadores, serán ampliamente diseñados - para cada caso, y evitar daños por efectos de la alta velocidad del gas. La profundidad de las cajas de aire, y mamparas o anillos ayudarán a mantener la misma cantidad de aire en todos los quemadores independientemente del lugar en que se encuentren.

El cabezal de gas debe ser bien purgado a través de una línea de venteo, antes de tratar de encender el primer quemador. El venteo permanecerá abierto al encender el primer quemador, debido a que el flujo de gas que se descarga por el venteo hace más fácil mantener estable la presión del

cabezal a quemadores. Dependiendo de la instalación que haga, la presión de gas puede mantenerse abriendo gradualmente el gas al quemador y manteniendo la presión a un valor seguro en el cabezal.

Antes de que el gas pase al primer quemador, debe purgarse bien el hogar por un tiempo no menor a 5 minutos con un buen flujo de aire, se prender<sub>á</sub> con una bujía o sistema de chispa eléctrica. Si la flama se pierde, el suministro de gas debe inmediatamente cortarse y el hogar se purgará por 5 minutos por lo menos con 30% del máximo flujo antes de volver a encender el quemador. Después que el quemador se enciende, el flujo de aire y de gas se ajustarán para dar una flama estable, parcialmente azul y con extremo amarillo, lo cual quemará el gas antes de que golpee las paredes o tubos de la caldera. A medida que se encienda cada quemador subsecuentemente, los quemadores que estén en operación se inspeccionarán para ver si aún están encendidos y que la relación gas-aire es satisfactoria. Alguna pulsación o ciclaje de presión en los hogares que queman gas se llega a observar, lo cual es inherente al combustible; -

cuando el tiro no fluctúa más de los 5 mm. de agua en total ésto no es serio. Aparentemente el grado de mezcla aire-combustible, así como las proporciones del hogar, quemador, y dispositivos físicos tienen un efecto considerable en la pulsación experimentada.

TABLA 4.1.

CARACTERISTICAS DE DISEÑO DEL QUEMADOR PARA QUEMAR  
GAS NATURAL

(Tomado de Sistemas de Combustión Industriales del Manual de Ingeniería de Gas, Industrial Press Inc.)

Sistema	Premezclado parcial requiriendo aire secundario.
Tipo de mezclador	Mezclador de gas tipo Jet ó a chorro de gas a presión y aire $\approx$ cero presión.
Método control de la mezcla.	Manual/automático
Control de volumen (manual ó automático)	Válvula en línea de entrada del gas ó en la descarga que viene desde el mezclador.
Tipo de quemador (boquilla)	Toberas (tipo difusor)

Este sistema es simple y muy flexible, ver fig. 4.1. puede emplear una amplia variedad de toberas abiertas o quemadores ya sea de orificio individual o de tipo múltiple. Usualmente la mezcla contiene menos de la mitad que el aire requerido para la combustión, el rango de la velocidad en la tobera es de 21951,2 metros/hora hasta 658.548 m/hr. A causa de que la relativamente pobre mezcla del aire secundario con la flama en muchos tipos de quemadores, una gran cantidad de exceso de aire puede ser requerido. El control del aire secundario puede ser ya sea variable o ya sea fijado a través del rango de capacidad. Este sistema es usado generalmente en un rango de temperaturas desde 648.9 a 1648.9°C, para cámaras de combustión que liberan hasta 311'465.000 Kcal/hr m<sup>3</sup>. En los gráficos A.1 y A.5 se pueden observar estas características de diseño.

#### MEZCLADOR DE GAS TIPO JET O A CHORRO

La cantidad de fluido (aire) que puede ser entrado por un fluido dado (gas natural) depende de la presión del gas en el orificio, la eficiencia de arrastre en el mezclador, y la resistencia al arrastre a la salida del mezclador. Como estos factores

son independientes del tamaño, la presión de la mezcla que puede ser desarrollada por un fluido dado puede ser estimada empíricamente. Las tablas B.5 y B.6 dan presiones de mezclado máximo para varios gases calculados desde la ecuación:

$$P_m = \frac{CE^2 G P_g}{(1 + R)(G + R)}$$

$P_m$ : presión de la mezcla estática, en pulg  $H_2O$   
(Ver

C: coeficiente de conversión de presión de velocidad a presión estática en la mezcla para mezcladores bien diseñados:

$C$	$\bar{C}$
Aire entrado por gas 0.85 - 0.95	0.9

E: Coeficiente de arrastre, dependiendo del diseño (Ver B.5) de donde  $E = 1$

G: gravedad específica del fluido entrando  
(aire = 1) donde  $SG = 0.95$

$P_g$ : presión manométrica del fluido entrando en el orificio, en pulg  $H_2O$ .

Para este caso  $P_g = 50 \text{ psi} = 1385,5 \text{ pulg. } H_2O$

R: Razón del fluido entrado al fluido que entra,  $9,64 \frac{m^3 \text{ aire}}{m^3 \text{ gas}}$

$$\begin{aligned}
 \text{PCI} &= 8211, \text{ Kcal/m}^3 \\
 \text{SG(gas nat)} &= 0.52065 \\
 \text{Pg} &= 50 \text{ psi} = 3.52 \text{ Kg/cm}^2 = 1385.5" \text{ H}_2\text{O} \\
 \text{razón} &= 9.64/1 \\
 \text{SG(mezcla)} &= 0.95 \\
 \text{E} &= 1 \\
 \text{C} &= 0.9
 \end{aligned}$$

$$P_m = \frac{0.9 \times 1 \times 0.95 \times 1385.5}{(1 + 9.64)(0.95 + 9.64)}$$

$$P_m = 10.51" \text{ H}_2\text{O} = 0.38 \text{ psi}$$

$$= 267 \text{ mm H}_2\text{O} = 0.027 \text{ Kg/cm}^2$$

Idealmente los mezcladores de gas a chorro pueden ser diseñados individualmente para cada instalación para seguridad de la máxima presión de mezcla.

El área de descarga del quemador manejada por un mezclador de gas a chorro podría ser menor que de la tubería de salida, pero suficientemente grande para manejar el volumen de la mezcla gas-aire a la presión desarrollada de acuerdo al cálculo anterior o sea a 10.5" H<sub>2</sub>O.

Un quemador, por causas inherentes a la distribu-

ción del gas, puede alimentarse en distintos momentos con mezclas de gas de diferentes características y distintas presiones de distribución. Para poder afrontar de manera satisfactoria las más severas condiciones de trabajo a que puede verse sometido, es necesario que tenga una "gran elasticidad" de forma que sea capaz de garantizar ante todo la estabilidad de llama. Por experiencia se sabe que la velocidad de propagación, para un gas determinado mezclado previamente con aire, alcanza su valor máximo en condiciones estequiométricas, es decir, en mezclas que contienen una cantidad de aire suficiente para provocar una combustión neutra (aire - estequiométrico).

Por tanto, dos de los principales factores que determinan la velocidad de propagación son:

- a) la naturaleza del gas;
- b) la proporción del gas en la mezcla.

A fin de que la llama sea estable a la salida del quemador, será preciso que la velocidad de salida de la mezcla aire-gas sea igual a la velocidad de combustión o velocidad de propagación de llama.

Además de los dos factores dichos anteriormente,

a efectos de la formación de una llama estable, son importantes:

- a) la presión del gas;
- b) la temperatura del gas y del aire
- c) el tipo de quemador

De acuerdo a la elección del quemador apropiado en la fig. 4.1, se observa su configuración:

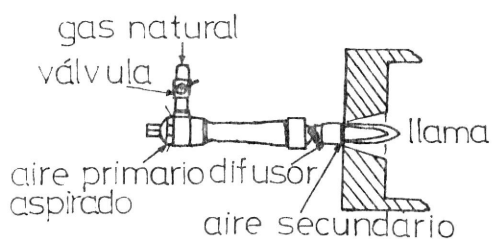


Fig. 4.1.— Mezclador de gas a chorro

CALOR ESPECIFICO DEL GAS NATURAL AL COMBINARSE

CON O<sub>2</sub>.

		%	C <sub>p</sub>
C :	74.8%	CO <sub>2</sub> : 6.23	0.1989
O <sub>2</sub> :	0.034%		
H <sub>2</sub> :	24.68%	H <sub>2</sub> O: 12.34	0.446
N <sub>2</sub> :	0.49%	N <sub>2</sub> : 46.63	0.2485

$$C_p = 0.2811 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{K}$$

CALCULO TEMPERATURA DE LA MEZCLA: GAS + AIRE

$$m_G + m_a = m_T \quad ; \quad H_G + H_a = H_T$$

$$m_G h_G + m_a h_a = m_T h_T$$

$$m_G C_{pG} T_G + m_a C_{pa} T_a = m_T C_{pT} T_T$$

$$T_T = \frac{m_G C_{pG} T_G + m_a C_{pa} T_a}{m_T C_{pT}}$$

$$T_T = \frac{11.691.66 \text{ Kg/hr} \times 0.52 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{K} \times (293)^\circ\text{K} + 21802,45 \text{ Kg/hr} \times 0.24 \times (623.8)}{33494,11 \text{ Kg/hr} \times 0.2811 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{K}}$$

$$T_T = 535,87^\circ\text{K} \quad (\text{ó } 262,87^\circ\text{C})$$

CALCULO CONSTANTE DE LA MEZCLA

$$m_G R_G + m_a R_a = m_T R_T$$

$$R_T = \frac{m_G R_G + m_a R_a}{m_T}$$

$$= \frac{11.691,66 \times 51.95 + 21802,45 \times 29.27}{33.494,11}$$

$$R_T = 37.19 \frac{\text{Kg m}}{\text{Kg } ^\circ\text{K}}$$

CALCULO PRESION DE LA MEZCLA (2)

$$P = \rho RT$$

$$= 0.82 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 37,19 \frac{\text{Kg m}}{\text{Kg}^\circ\text{K}} \times 535,87 \text{ }^\circ\text{K} \frac{1 \text{ m}^2}{10.000 \text{ cm}^2}$$

$$p = 1.63 \text{ Kg/cm}^2 \text{ a}$$

CALCULO DE K DE LA MEZCLA

$$R = \frac{37.19}{426.8} = 0.08714$$

$$C_V = C_P - R = 0.2811 - 0.08714 = 0.19396$$

$$K = \frac{C_P}{C_V} \quad K = 1.45$$

VELOCIDAD DEL SONIDO Y NUMERO MACH (3)

$$C = \sqrt{1.45 \times 37.19 \times 535,87 \times 9.81} = 532.43 \text{ m/seg.}$$

$$M = \frac{v}{c} = \frac{182.93}{532,43} \quad M = 0.34$$

VELOCIDAD SONIDO DEL GAS NATURAL

$$C = \sqrt{1.3 \times 51.95 \times 293 \times 9.81} = 440.59 \text{ m/seg.}$$

TABLA 4.2.  
CARACTERISTICAS DE DISEÑO DEL RANGO DE TRABAJO DEL QUEMADOR

GENERACION (MW)	TEMPERATURA DE ENCENDIDO ( $^\circ\text{C}$ )	VELOCIDAD DE SALIDA (m/seg)
73	- 1648.9	- 182.93
55	1398.9	138.72
36	1148.9	94.52
18	898.9	50.31

CALOR LIBERADO POR CADA QUEMADOR = 39.592,21 Kcal/hm<sup>3</sup>

Volumen hogar = 795 m<sup>3</sup> (dato tabla 5.2)

TABLA 4.3

CARACTERISTICA Y PROPIEDADES DEL GAS NATURAL Y DE LA MEZCLA

(Fig. 4.1)

	GAS NATURAL	MEZCLA
Calor específico (Kcal/Kg°K)	0.52	0.2811
Temperatura °C	20 (en 1)	262.87°C (en 2)
R (Kgm/Kg°K)	51.95	37.19
presión absoluta (Kg/cm <sup>2</sup> )	4.55 (en 1)	1.63 (en 2)
K	1.3	1.45
Velocidad sonido, C (m/seg)	440.59 (en 1)	532.43 (en 3)
Mach	0.20	0.34 (en 3) 0.56 (en 2)

NOTA:  $R(\text{aire}) = 29.27 \frac{\text{Kgm}}{\text{Kg}^\circ\text{K}}$

Este tipo de quemadores, de acuerdo a lo especificado en el manual, es para cámaras de combustión (hogares) que liberan hasta  $311'465.000 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr m}^3}$ . En el caso específico de las unidades de la planta térmica Estero Salado, y de acuerdo a la tabla 5.2 el volumen total del hogar es de  $795 \text{ m}^3$ , se necesita  $237.553,26 \text{ Kcal/hr m}^3$ , es la cantidad de calor que los quemadores deben proporcionar al hogar, como son 6 quemadores, la cantidad de calor que proporcionará cada quemador sería de  $39592,21 \text{ Kcal/hr m}^3$ .

Para efectos de compra se lo hará dando las características al vendedor, señaladas en la tabla 4.4 que a continuación se detalla:

TABLA 4.4  
CARACTERISTICAS DEL QUEMADOR (Para comprarse)

Capacidad calor liberado:	$40000 \text{ Kcal/hr m}^3$
Rango velocidades:	$21951.2 - 658548 \text{ m/hr}$
Rango temperaturas:	$648.9 - 1648.9^\circ\text{C}$

Para diseñar el diámetro de la tubería de gas natural, se elige un diámetro tentativo; de tal forma que se obtenga una velocidad apropiada de acuerdo a lo que dice el fabricante. En igual forma se pro

cede con la tubería para aire primario.

En el diseño del difusor se debe tener en cuenta, que cuando se mezclan el Gas natural con el aire primario, su velocidad aumenta considerablemente alcanzando un Mach de 0.56 en (2) (ver gráfico - 4,1); con una presión 1.63 Kg/cm<sup>2</sup> a (tabla 4.4).

De acuerdo al grosor de la pared del hogar (20 cm. en fig. 4.1) se toma para el diseño del difusor una inclinación de 11° a efectos de que no haya - verticidad, por tanto, de acuerdo a lo dicho se tiene los respectivos diámetros dados en la tabla 4.4, para aquellas velocidades.

Para determinar la velocidad se procede así:

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

Ejemplo: en el caso del Gas natural se tiene un

$$\dot{V} = 3833,33 \text{ m}^3/\text{hr}$$

y el diámetro dado por el fabricante para una mejor disposición es de  $D = 12.5 \text{ cm}$ .

$$v = \frac{3833,33 \text{ m}^3/\text{hr}}{\frac{\pi}{4} (0.125)^2 \text{ m}^2 \cdot 3600 \text{ seg}/\text{hr}} = 86.77 \text{ m}/\text{seg}.$$

Dando un Mach de 0.20 de acuerdo a la velocidad sónica dada en la Tabla 4.3.

#### 4.2.3. Sistema de Registros de Aire

Debido a la naturaleza del Gas Natural, la cantidad de aire teórico necesario para una combustión perfecta es mayor que en el caso del Bunker, además debido a la misma razón el valor del exceso de aire recomendado por el fabricante es menor respecto al combustible anterior. La operación del sistema de registros de aire es prácticamente la misma para el caso de ambos combustibles, la variación está en la regulación de los instrumentos de control. En el cuadro de "Generación Real" se dan los valores de aire necesarios para quemar eficientemente el Gas Natural con los excesos de aire recomendados por el fabricante a diferentes cargas.

Los flujos de gas y aire deben dividirse uniformemente entre todos los quemadores, ajustando la forma de la flama y la distancia de ésta al quemador por medio de los registros del quemador. La cantidad de exceso de aire tiene efecto considerable sobre la flama, ya que ésta debe ser estable y no llegar con demasiada fuerza a las superficies adya

centes del hogar o de las paredes de tubos.

A fin de determinar el análisis de los gases de escape y la cantidad de exceso de aire deberán tomarse con regularidad lecturas con el aparato de Orsat; las líneas de muestreo para este objeto deberán estar libres de fugas y también dispuestas de modo que las muestras obtenidas sean representativas de los gases en la caldera.

Con una buena mezcla de gas y aire, y una adecuada distribución en los quemadores, es posible operar con excesos de aire mínimos ó cercanos a los establecidos teóricamente. Una condición primordial para conseguir y mantener ésto es que la obra de la caldera esté libre de grietas que permitan el paso del aire al interior del hogar diluyendo los gases producto de la combustión sin ningún efecto benéfico sobre ella.

Los quemadores que no están en servicio se ven expuestos a una cantidad considerable de calor radiante; para evitar que este calor los dañe se abre generalmente una pequeña cantidad de aire secundario a cada quemador que no esté en operación, a la vez que se impide un retroceso de llama. Este factor,

más el hecho de que la distribución de gas no es eficiente cuando no se opera con todos los quemadores, justifica el uso de mayor exceso de aire cuando la unidad trabaja a bajas cargas.

#### 4.2.4. Proceso de Combustión

En el caso del Gas natural, el principio de funcionamiento del proceso de combustión no varía sensiblemente respecto del anterior combustible, esto es, el Bunker C. Como ya se ha visto en la sección correspondiente, la cantidad teórica de aire necesario para una combustión perfecta del Gas, aumenta en relación al Bunker C, pero de acuerdo al fabricante el exceso de aire necesario es menor en el caso del Gas Natural como se ve en esta misma sección en la tabla 4.5 de "Generación Real Gas Natural", la cual fue obtenida de las figs. A.2 y A.3 en la misma forma que la tabla 3.1 de "generación real: Bunker C".

Estas acotaciones constituyen en realidad las diferencias a establecerse en el proceso de combustión del Gas natural respecto del Bunker, lo cual es motivo de regulación de los instrumentos de control del flujo de aire necesario para la combustión, pero como se dijo, el principio de funcionamiento -

permanece prácticamente invariable. Es decir las mismas indicaciones de operación que se hicieron en el caso del Bunker son aplicables al Gas Natural.

Es esencial mantener una buena mezcla de aire y combustible, así como la misma proporción de aire al combustible en cada quemador, o a todo lo ancho del alimentador, de éste modo se conseguirá una combustión completa. En la combustión del Gas Natural, se usa menor exceso de aire, ya que es necesario una deficiencia considerable en el aire para que se observe humo, pero con una deficiencia ligera, la flama se observará anaranjada en su punta y ligeramente humeante. Con una deficiencia de aire extrema se podrá observar humo en la chimenea, lo cual indicará decididamente una condición peligrosa.

Una flama de gas natural, siendo relativamente limpia y transparente, tiene una capacidad de radiación limitada si se compara con las flamas luminosas de los fuegos que produce el Bunker C. Por esta razón, cuando se trabaje en la planta con Gas Natural, se absorberá menos calor radiante.

El calor que no es radiado de los gases de la com  
bustión, sale del hogar en la corriente de gases  
calientes, los cuales se harán fluir sobre las su  
perficies de los supercalentadores, caldera y pre  
calentador de aire antes de abandonar la un  
idad. El flujo de gases calientes sobre estas superficies  
relativamente frías, causarán que el calor se -  
trasmita en proporción a las diferencias de tempe  
ratura entre el gas y el metal. Un flujo rápido  
de gas barrerá la caja de gases estáticos adyacen  
tes a las partes de la caldera, incrementando la  
proporción de intercambio de calor para una dife-  
rencia de temperatura dada. En general, la trans-  
misión de calor en la caldera debe mantenerse al-  
ta a fin de asegurar una correcta eficiencia; és-  
to es, desde luego, suponiendo que el Gas Natural  
se haya quemado eficientemente.

Ya que los quemadores están diseñados para traba-  
jar correctamente a determinadas presiones máxi-  
mas y mínimas, será necesario el poner y quitar  
quemadores en operación a fin de mantener la pre  
sión de alimentación dentro de estos límites. De  
acuerdo con la demanda de vapor y la presión en la  
caldera, la cantidad de gas con que se alimentan

Cond P y T  
M. H. H. H. H.  
✓

los quemadores es regulada por medio de una válvula manual y/o automática operada por el control de combustión. Frecuentemente se instalan alarmas a fin de señalar que la presión no se mantiene dentro de los límites establecidos. Para encender los quemadores se usan bujías inspeccionando al mismo tiempo las flamas de los quemadores en servicio, a asegurándose de que no se apaguen al encender los nuevos quemadores y que no baje la presión de gas en el cabezal de alimentación.

A continuación se obtienen los puntos de rocío reales para el Gas natural a diferentes cargas, es decir, usando el respectivo exceso de aire para una carga dada (fig. A.2) y además de considerar el porcentaje de agua contenida en el aire.

#### PUNTO DE ROCIO DEL GAS NATURAL PARA GENERACION REAL

##### A DIFERENTES CARGAS

Generación a 73 MW

$$EA = 4\%$$

$$\text{Aire teórico} = 59.02 \frac{\text{mol aire}}{\text{mol combust.}}$$

$$\text{Aire real} = 61.38 \frac{\text{mol aire}}{\text{mol combust.}}$$

PRODUCTOS COMBUSTION

$$\text{CO}_2: \quad 6.23 \times 1 \quad = \quad 6.23$$

$$\text{H}_2\text{O}: \quad 12.34 \times 1 + 1.29^* = 13.63$$

$$\text{SO}_2:$$

$$\text{N}_2: \quad 61.38 \times 0.79 \quad = \quad \frac{48.49}{68.35} \frac{\text{mol Humos húmedos}}{\text{mol Gas Natural}}$$

$$54.72 \frac{\text{mol Humos secos}}{\text{mol Gas Natural}}$$

$$*\text{moles H}_2\text{O en aire} = \frac{61.38 \times 29 \times 0.013}{18} = 1.29$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{13.63}{68.35} \times 100 = 19.94\%$$

$$\text{presión parcial} = 0.1994 \times 14.7 = 2.93 \text{ psia}$$

temp. saturación:

$$T_{\text{punto rocío}} = 60.3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (140.47^\circ\text{F})$$

En la misma forma que para el caso del Bunker C, la condición óptima de funcionamiento de la caldera es dada por el gráfico A.2, que proporciona los porcentajes de  $\text{O}_2$  presente en los gases combustiónados, dado para distintas cargas.

Para el  $\text{CO}_2$ (%) se hace el mismo cálculo iterativo que se hizo con el Bunker, a diferencia de que - ahora el % de C es de 74.8 y el aire teórico es de

TABLA 4.5  
GENERACION REAL: GAS NATURAL

GENERACION (MW)	73	55	36	18
O <sub>2</sub> (%) Orsat	0.8 - 1.1	1.55 - 2	3.3 - 4	9.5
CO <sub>2</sub> (%) Orsat	11.31 - 11.17	10.86 - 10.62	9.85 - 9.51	6.37
Exceso aire (%)	3 - 4	7 - 9	17 - 20.5	75
Kg aire real	17.64 - 17.82	18.3 - 18.67	20 - 20.64	29.98
Kg Gas Nat.				
Mol aire real	60.79 - 61.38	63.15 - 64.3	69 - 71.12	103.29
Mol Gas Nat.				
Mol humo húm.	67.86 - 68.35	69.78 - 70.74	74.57- 76,24	102.33
Mol Gas Nat.				
Mol humo seco	54.25 - 54.72	56.12 - 57.05	60.78- 62,41	87,83
Mol Gas Nat.				
Moles H <sub>2</sub> O en el aire	1.27 - 1.29	1.32 - 1.35	1.45 - 1.49	2,16
H <sub>2</sub> O (%) en los gases de combustión	20 - 19.94	19.58 - 19.35	18.49 - 18,14	14.17
Presión parcial (psia)	2.95 - 2.93	2.88 - 2.84	2.72 - 2.67	2,08
Temperatura punto rocío (°C)	60.45 - 60.3	59.9 - 59.6	58.7 - 58,3	52.78

AIRE TEORICO = 17.13 Kg/Kg Gas Natural = 59.02 Mol/mol Gas Natural

17.13 Kg aire/gas natural, lo cual cambia el aire real también.

#### 4.3. REGULACION Y CONTROL DE COMBUSTION

A fin de lograr un adecuado proceso de combustión, evitando peligrosas acumulaciones de gas natural no quemado y otras situaciones en las cuales se corre el riesgo de explosión, se lo consigue mediante el empleo de un equipo completo de instrumentos, reguladores, controladores, válvulas de distintos tipos que es menester usar en la forma más precisa y correcta, que de este modo asegura un alto rendimiento del combustible a usarse, el cual, es el gas natural.

Para una mejor apreciación de este complejo sistema se lo ha subdividido en diferentes secciones, tales como:

- 4.3.1. Sistema de control de la razón gas natural/aire.
- 4.3.2. Diagrama de flujo diseñado para el Gas Natural en la Central Estero Salado.
- 4.3.3. Control de presión de la razón Gas Natural/aire; reguladores de presión.
- 4.3.4. Control de flujo de la razón Gas Natural/aire.
- 4.3.5. Controles de seguridad
  - 4.3.5.1. Válvulas automáticas de corte de gas
  - 4.3.5.2. Sistema de válvulas supervisoras.

#### 4.3.6. Sistema de control de quemadores.

Estos puntos tratan de enfocar la descripción de los distintos elementos de regulación y control de combustión que podrían ser utilizados en caso de llevarse a efecto su ensamblaje.

##### 4.3.1. Sistema de control de la razón Gas Natural/aire

La operación de los reguladores de gas natural/aire será descrita más adelante. Los reguladores pueden siempre ser instalados en líneas horizontales a menos que la instrucción de los fabricantes señale otra manera. Ello no debe ser fijo, así el resorte puede no propiamente balancear el peso del ensamblaje del diafragma.

Cada zona de control requiere un regulador de razón gas natural/aire por separado. Un regulador por quemador provee de gran flexibilidad, pero varios quemadores pueden ser controlados por un regulador individual si las capacidades son igualadas propiamente. Si la suma de presiones a través de un regulador y la presión de impulso aplicada excede la presión de combustible corriente arriba, el regulador no puede funcionar propiamente. Los reguladores podrían ser colocados tan

cerrados a los quemadores como sea posible sin sobrecalentamiento, de manera que minimice la fricción variable en la tubería corriente abajo. Un regulador requiere una resistencia constante corriente abajo. Las conexiones en la línea de impulso hacia la línea principal de aire de combustión desde la válvula de control y los diámetros de la ramificación corriente arriba desde el próximo accesorio de modo que la presión de impulso no sea adversamente afectada por una distribución de presión desigual en la tubería. Los tapones de impulso podrían saltar repentinamente con la superficie interna de la tubería, y paralelo al eje de la válvula de control. Las tapas no podrían ser localizadas sobre el lado del botón de la línea de aire, donde ella puede llegar a ser llenada y tapada con suciedades, agua, o aceite. Venteos atmosféricos podrían ser utilizados para proteger de estos extraños agentes.

Los sistemas de quemadores a gas premezclados - mediante toberas mezcladoras requieren gas a una gran presión mayor que la del hogar, y esta presión debe ser proporcional a la presión de aire

en el quemador. Como muestra la fig. 4.2, una línea de impulso es usada para conducir la presión de aire puesta por la válvula de control de aire al regulador de la razón de gas, el cual entonces produce automáticamente una presión de gas de salida igual a la presión de impulso de aire. Por tanto la presión superior entre la válvula de control de aire y el hogar es la misma proporcionalmente a la presión superior entre el regulador de gas y el hogar. Por ajuste de la válvula de orificio limitante en la línea de gas es posible para establecer la razón de gas a la del flujo de aire. Esta razón será entonces mantenida en toda la razón de quemado hasta llegar al regulador será siempre mantenida igual a la presión superior a través de los orificios en los pasos de aire del quemador y la válvula de gas de orificio limitante. Esto es verdadero, por supuesto, solamente si todo del aire para la combustión está siendo suministrado a través del quemador (100% de aire primario). Fluctuaciones en la presión del hogar tienen igual efecto sobre ambos flujos tanto de gas natural como de aire; de modo que no hay necesidad para cualquier conexión entre

este sistema y la presión de la cámara de combustión.

Para cualquier sistema de quemadores con mezclador de tobera donde la presión de gas utilizable es menor que la suma de presiones de aire y la presión superior del regulador, ésto es necesario, en cuyo caso se puede adaptar para hacer purga. Un purgador es simplemente una fuga constante en la línea de impulso, que reduce el impulso aplicado al regulador para un valor proporcionalmente bajo. Esto significa que la presión de salida del regulador será menor que, pero proporcional a la presión en la línea de aire. La válvula de orificio limitante podría ser ampliamente operada como se muestra en la fig.4.2.

En la planta se usa aire precalentado en el calentador de aire a vapor y luego por el regenerativo, por lo cual se pueden usar sistemas de control de la razón gas natural/aire para uso con aire precalentado, son muy diversos. Cuando hay solamente una zona de control para cada aire precalentado y si no hay aire puede ser colocado corriente arriba del aire caliente y un controlador de razón gas natural/aire tipo flujo puede

ser usado.

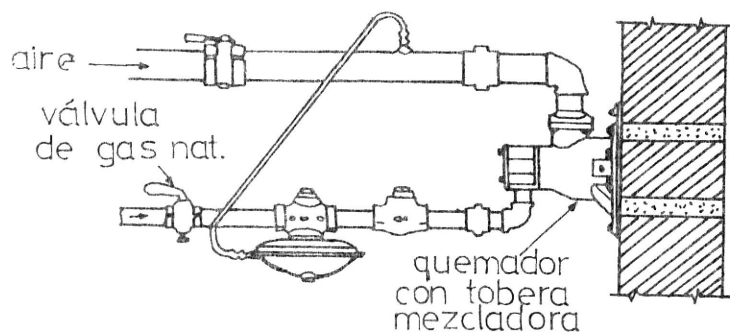


Fig. 4.2.— Quemador con mezclador de taberna. La presión del Gas Natural es mayor que la presión del aire. La cámara de combustión es presionada estable o fluctuantemente.

4.3.2. Diagrama de flujo para el sistema de combustión, usando gas natural como combustible: parámetros.

En la fig. 4.3, se puede apreciar el diagrama de flujo para gas natural, aplicado a la Central Estero Salado, este diseño fundamentado en la experiencia y la técnica, muestra como el combustible llega a la Central y es reducida su presión, para luego pasar al sistema de combustión; en el diagrama se observan además diferentes tipos de válvulas, indicadores de presión, transmisor de flujo, orificios, válvulas de corte de combusti-

ble, reductores y expansores de presión.

Como ya se ha establecido en los puntos anteriores, el Gas natural debe encongrarse en el cabezal de quemadores a  $3.52 \text{ Kg/cm}^2\text{g}$  (50 psig) listo para su uso. Mientras que desde la fuente de origen es recibido a  $42.19 \text{ Kg/cm}^2\text{g}$  (600 psig), por tanto el regulador de presión, debe disminuir la presión hasta un valor cercano al indicado para el cabezal de quemadores. Este valor depende, de la longitud donde será colocado el regulador de presión hasta la válvula maestro de corte de combustible, y la altura que debe subir el combustible para alcanzar el cabezal de quemadores.

El diagrama muestra también un circuito de nitrógeno, el cual está provisto de válvulas globo normalmente cerradas, las cuales serán abiertas, alternadamente ó según las circunstancias cuando el sistema de combustible con Gas natural, sale de servicio, ya sea por baja presión o por reparación ó algún otro motivo, de tal forma de dejar limpias las tuberías que conducen el combustible, evitando así cualquier almacenamiento de Gas Natural en alguna parte de la caldera sin quemar, llevando a una situación de real peligro como ya se

ha dicho.

El sistema está provisto también de válvulas de venteo, las cuales pueden servir para purgar el Gas natural a la atmósfera en caso necesario. También posee orificios, los cuales sirven para hacer caer cualquier condensado que haya podido filtrarse.

La válvula de corte de combustible funciona de acuerdo con el sistema de alarmas y fallas de caldera, cerrando el paso del combustible en caso necesario, mientras que estas válvulas colocadas en cada quemador, también se mantienen normalmente abiertas cuando el quemador está funcionando, pero cierran el paso de combustible ante cualquier falla localizada en el sistema de alarma de caldera, o se cierra a voluntad del operador cuando es necesario disminuir la carga hasta un punto en el cual se hace necesario sacar quemadores fuera de servicio.

A un lado del diagrama, se puede apreciar en detalle la alimentación de Gas natural a cada quemador, en la cual se aprecia una válvula de corte solenoide que actúa conectada a una foto

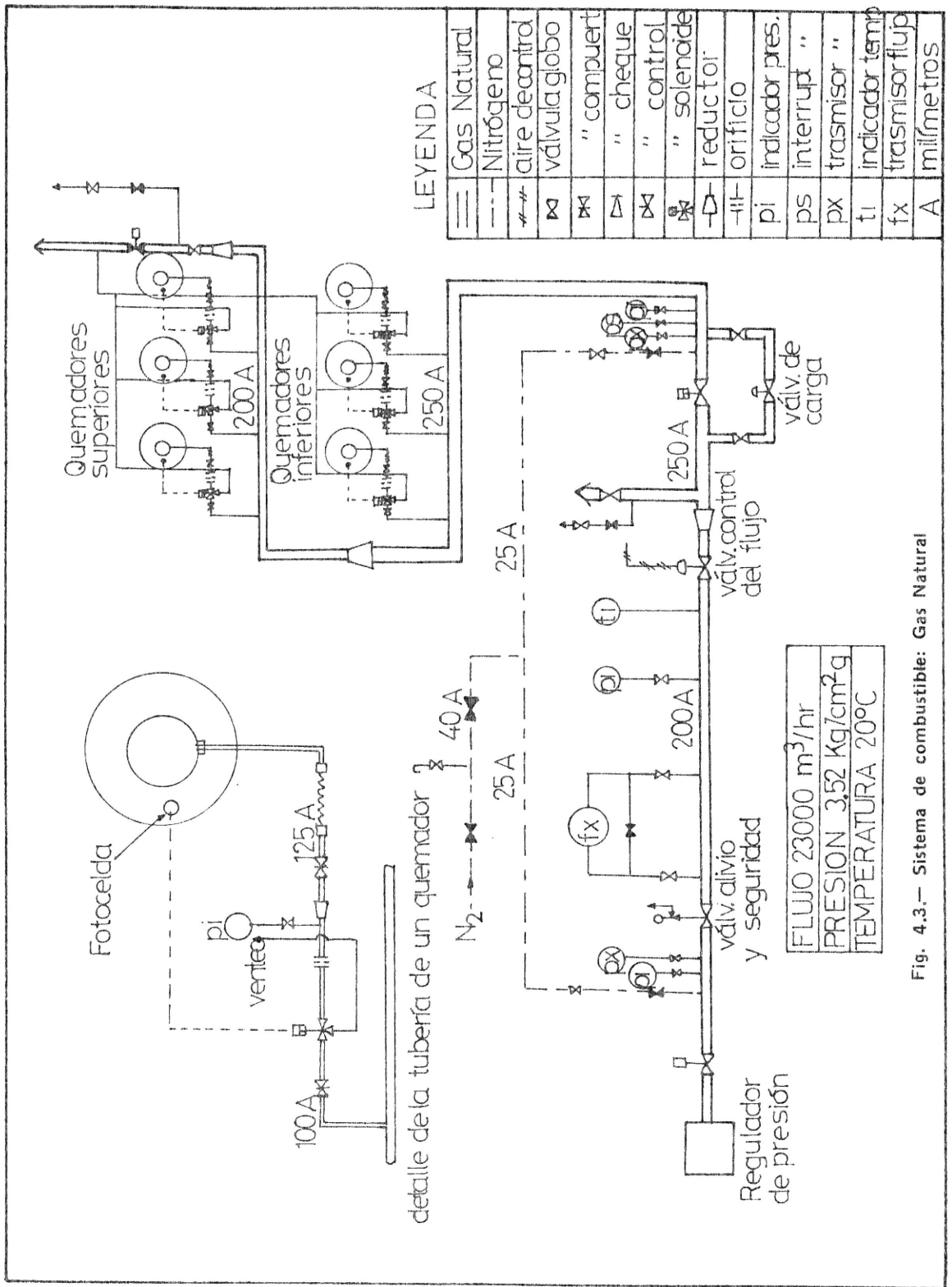


Fig. 4.3.— Sistema de combustible: Gas Natural

DISEÑO DE DIFUSOR PARA LA SALIDA DE LA MEZCLA ③

de Figura 4.1

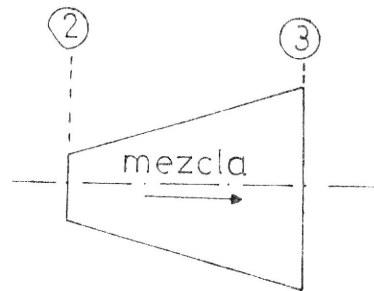
$$Q_3 = \frac{\pi}{4} D_3^2 v_3$$

$$Q_3 = 40786,66 \frac{m^3}{hr} \quad (\text{tabla 4.3})$$

$$v_3 = 182.93 \frac{m}{seg} \quad (\text{diseño tabla 4.2})$$

$$D_3 = \sqrt{\frac{4 Q_3}{\pi v_3}} = \sqrt{\frac{4 \times 40786,66}{\pi \times 182.93 \times 3600}}$$

$$D_3 = 28.08 \text{ cm. (11.06 pulgadas)}$$



$$p_2 = 1.63 \text{ Kg/cm}^2$$

$$p_3 = p_{\text{hogar}} + 20\% p_{\text{hogar}} = 1.26 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2 \text{a}}$$

$$v_3 = 182.93 \text{ m/seg.}$$

$$D_3 = 28 \text{ cm.}$$

$$v_2 = ? \quad D_2 = ?$$

TABLA 4.6  
CARACTERISTICAS DE TRABAJO PARA EL FLUJO DE GAS NATURAL PARA SOBRECARGA DE GENERACION

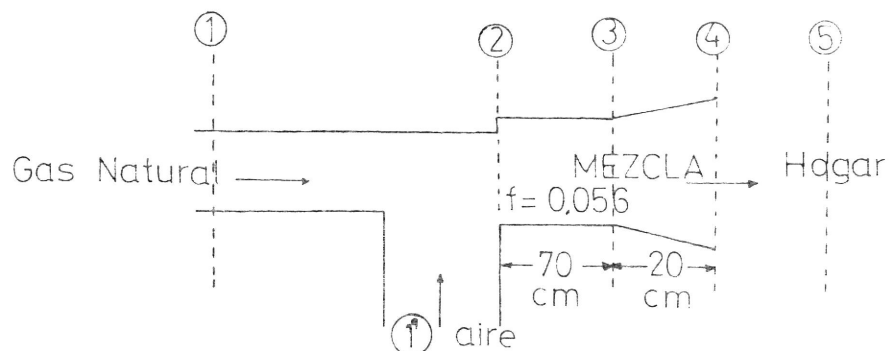


Fig. 4.1.— Mezclador de gas a chorro

FLUIDO	(1) Gas Nat.	(1') Aire prim.	(2) Mezcla	(3) Mezcla	(4) Mezcla	(5) Hogar
Volumen total (m <sup>3</sup> /hr)	23.000	221.720	244.720	244.720	244.720	244.720
Masa Total (Kg/hr)	70.150	130.814,8	200.964,8	151.726,4	159.068	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	3,05	0,59	0,82	0,62	0,65	
Volumen cada quemador (m <sup>3</sup> /hr)	3.833,33	36.953,3	40.786,66	40.786,66	40.786,66	40.786,66
Masa cada quemador (Kg/hr)	11.691,66	21.802,45	33.494,11	25.287,73	26.511,33	
Velocidad (m/seg)	86,77	238	272,69	364,32	182,93	
Presión (Kg/cm <sup>2</sup> a)	4,55	1,07	1,63	1,18	1,26	1,05
Temperatura (°C)	20	350,8	262,87	239	248,23	1.526,29
Diámetro (cm)	12,5	18	23	23	28	
Mach	0,20	0,48	0,52	0,70	0,35	

celda, luego un orificio, una válvula de compuerta y una tubería flexible. La conexión con la fotocelda puede estar conectada con retrasador de tiempo, el cual actúa retrasando el tiempo, ya que una vez detectada una condición anormal en el hogar, permite unos 2 seg., o el tiempo que de el fabricante, para permitir reponer la falla, si al cabo de ese tiempo la falla no ha sido re- puesta la válvula de corte solenoide cierra el - paso al Gas Natural. De igual manera cuando ocu- rre una baja de presión de suministro de combus- tible, la válvula permite hasta aproximadamente el 50% de la presión requerida un tiempo dado por el Retrasador de tiempo, al cabo del cual si no se repone el valor de presión, la válvula cierra el suministro de combustible. Es decir, este sistema permite una operación segura del sistema para en todo momento evitar una acumulación peligrosa de combustible sin quemar.

En la tabla 4.6 se puede observar las condicio- nes en las que el Gas natural y el aire primario fluyen para luego formar la mezcla de acuerdo a la proporción dada en la sección 2.3.9. Es conocido la cantidad necesaria de Gas natural para

tener una máxima generación, sin embargo, en ocasiones el sistema se sobrecarga hasta 75 MW, es decir un 3% más, razón por la cual también se ha diseñado el sistema para una demanda mayor en el mismo porcentaje.

Desde el punto (2) hasta el (3) se considera a la sección idealmente adiabática con una superficie de acero sin pulir, es decir bastante rugosa. Mientras que desde el punto (3) al (4) isentrópica, la mezcla fluye a través de un difusor, en la cual se aumenta la presión a costa de una pérdida de velocidad.

El diámetro de 2-3 se ha tomado en 23 cm. mientras que en el punto (4) es de 28 cm. el ancho de 3-4 es de 20 cm. de tal forma que el ángulo de abertura del difusor es de  $8^\circ$ , de acuerdo a lo especificado por el fabricante, evitando vorticidad.

El diseño se ha hecho para flujos subsónicos de tal forma que no ocurran estrangulamientos y finalmente vórtices y turbulencias incontrolables.

En la sección 2-3 se ha tratado en lo posible

que no haya transferencia de calor, el diseño se hizo asumiendo números de Mach, diámetros, de tal manera que la velocidad se incremente, mientras que la presión disminuye, lo cual es lógico para tuberías de sección constante en procesos adiabáticos, hasta llegar al punto (3) con una presión menor que la de (4) y una velocidad mayor que la de ese punto, de tal forma que el difusor cumpla luego la función que le corresponde. Todo lo cual sucede individualmente en cada quemador. Indudablemente que habrán otras formas de diseño, pero para este caso luego de un detenido estudio se ha determinado este tipo de quemador.

#### 4.3.3. Control de la presión de la razón Gas natural/Aire : reguladores de presión

El control de presión de la razón Gas Natural/aire trabaja sobre la asunción que la resistencia al flujo corriente abajo desde las válvulas de control es una constante en ambas líneas de, ya sea de combustible como de aire de cualquier sistema de quemadores. Por teoría, es conocido que el flujo a través de una resistencia constante es proporcional a la raíz cuadrada de la pre-

sión diferencial a través de esa resistencia. Sin embargo, si las presiones del combustible y el aire son mantenidas proporcionalmente iguales, entonces las razones de flujo de combustible y aire podrían ser proporcionales a través de todas las partes del rango de entrada de la razón de quemado. El sistema de control de presión trabaja con áreas constantes y presiones variables, ésto es más exacto y adaptable a una amplia variedad de disposiciones.

Es una práctica común colocar la válvula de control de la entrada principal en la línea de aire y usar el regulador de la razón gas/aire en la línea del combustible, el regulador será conectado al través de la línea de aire. Cuando se quema gas, el regulador es un aparato que duplica la presión de aire en la línea de combustible. Esta consiste de una válvula tipo globo en la cual el tapón es ajustado y movido por un diafragma. La presión sobre un lado del diafragma es la de la línea de aire, transportada a un espacio abajo del diafragma por una línea de impulso (tubería pequeña). La presión sobre el otro lado del diafragma es la de la presión de

retroalimentación en la línea de combustible corriente abajo desde el regulador. Por tanto, si la presión de combustible y aire no son las mismas, una fuerza de desbalance actúa sobre el diafragma causando que éste se mueva. Esto en cambio mueve la válvula que hace de tapón ó cuña, ajustando el flujo con lo cual corrige la presión del combustible corriente abajo hasta que la diferencia de presión entre el combustible y el aire sea cero. La fig. 4.4 muestra una vista recortada de un regulador usado para el control del flujo de gas natural. Notar la corrección de la tubería pequeña abajo del diafragma para la línea de impulso y el tubo de presión principal des

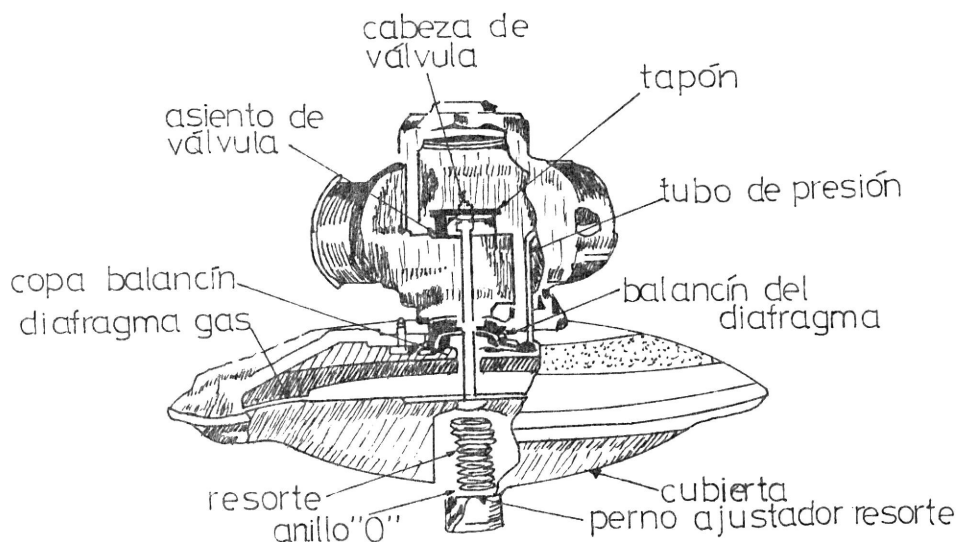


Fig. 4.4.— Regulador de la razón gas / aire

de la cámara superior hacia el lado de la válvula corriente abajo. Si la conexión de impulso está a la izquierda abierta a la atmósfera el regulador producirá cero de gas para la succión tipo mezclador y quemadores de premezcla. El resorte de abajo del eje está solamente con el propósito de contrabalancear el peso del eje, tapón y diafragma de manera que el diafragma flote libremente. La presión del gas corriente arriba actúa sobre el lado de abajo de la válvula tipo tapón empujando a toda fuerza para levantar el tapón, de este modo un balanceamiento del diafragma es añadido al eje entre el cuerpo de la válvula y el cuerpo del diafragma. En aplicaciones donde la máxima presión utilizable de gas es menor que la presión máxima del aire de combustión, el sistema precedente podría fallar al mantener proporcional las presiones de combustible y aire a una alta razón de flujo de aire. En esa forma una situación de éstas es necesaria para producir presión en la línea de impulso menor que la proporcional a la presión en la línea de aire de combustión. Esto es acompañado por el uso de sangradores o purgas, las cuales permiten una cierta cantidad de filtración o goteo desde la cone-

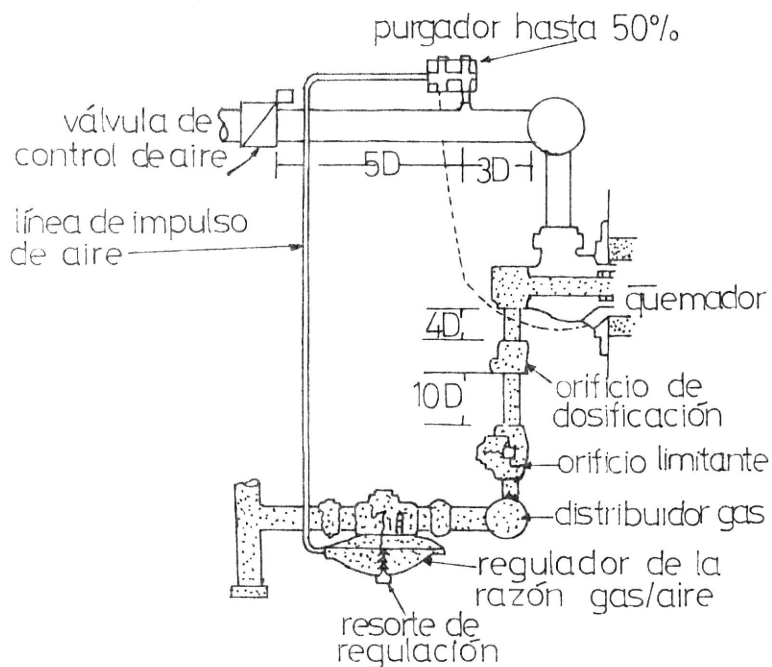


Fig. 4.5.— Tubería para un regulador de presión de la razón gas/aire

xión de impulso y con lo cual reduce la presión actuando sobre el diafragma regulador. En la fig. 4.5 se ilustra un sistema conectado en esta manera. La válvula de orificio limitadora es una resistencia de área constante en la línea de gas. La apertura de esta válvula puede ser puesta para dar la razón de gas natural/aire deseada cuando el sistema es primero puesto en operación.

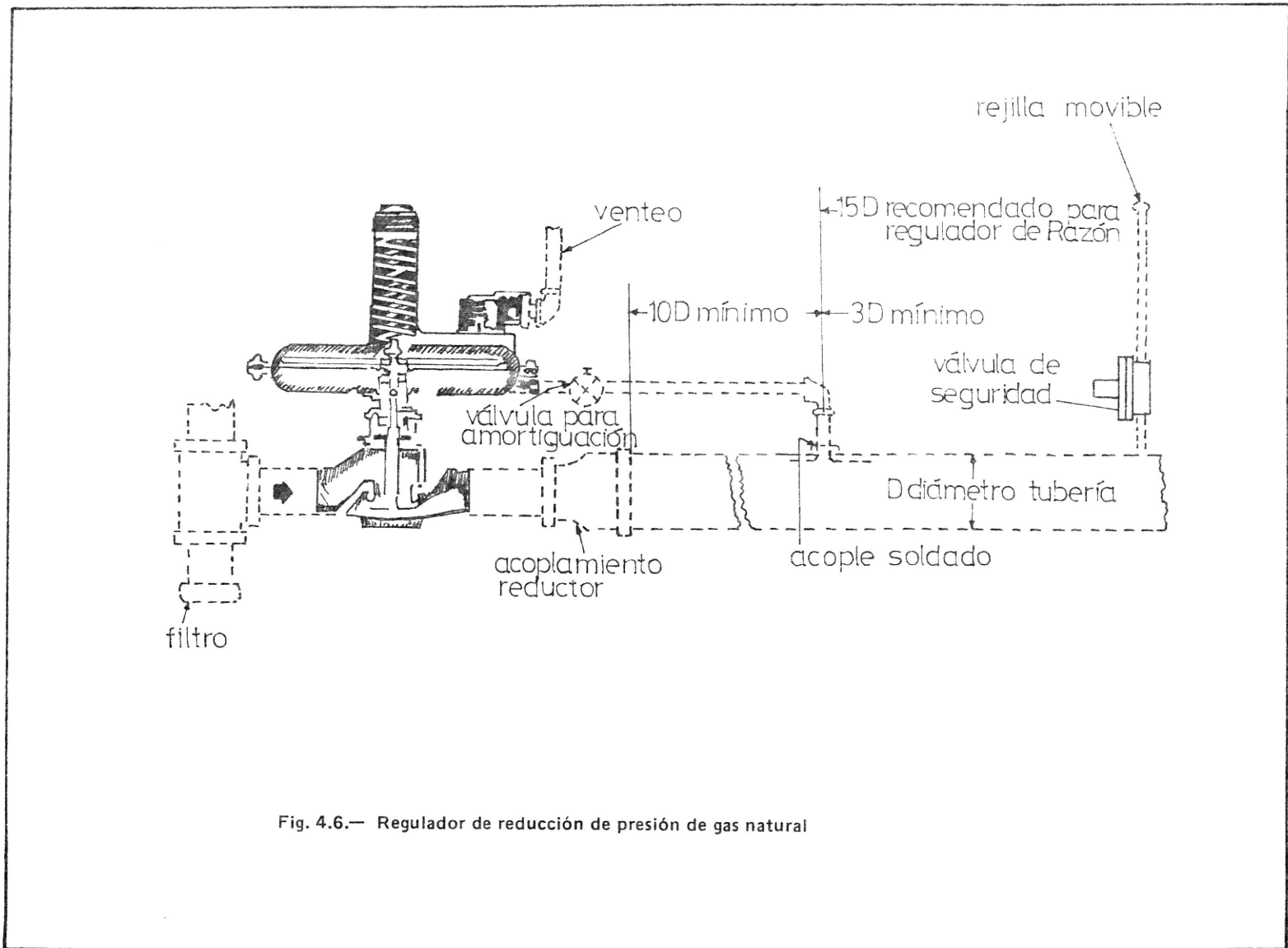
#### REGULADORES REDUCTORES DE PRESION

Pueden ser usados corriente arriba de la mayoría

de controles de razón combustible/aire, hasta la caída de la presión de suministro a un nivel práctico y para mantener una presión de entrada constante en toda la razón de flujo. Uno de los tales reguladores puede suministrar un número de reguladores de razón combustible/aire.

La fig. 4.6 muestra un regulador reductor de presión. La presión regulada corriente abajo actúa sobre uno de los lados del diafragma mientras que un resorte de parada automática es balanceado contra éste sobre el otro lado del diafragma. La válvula permanecerá abierta tanto como sea la presión corriente abajo, ya sea demasiado baja para balancear el empuje constante del resorte. La cámara superior del regulador de presión del gas puede ser venteada por puertas exteriores para seguridad en el caso de ruptura del diafragma. Una válvula de seguridad que ventee por el lado externo podría estar localizada corriente abajo del regulador de presión del gas para evitar una excesiva presión transversal contra la válvula y el regulador cuando los quemadores son apagados.

Los reguladores de presión de alivio o válvulas



de alivio son similares al regulador reductor de presión excepto que para la presión regulada es la presión corriente arriba. Esto es usado para sangrar la presión de exceso.

Controladores de Presión, pueden funcionar ya sea como el sistema antes dicho, pero usan una fuente externa de potencia (hidráulica, neumática o eléctrica). Los controladores son usados en vez de los reguladores para gases sucios, enlodados y para grandes tamaños de tubería.

Control automático de la presión en el hogar, este control ayuda a establecer un control preciso en la razón combustible/aire, para proveer una presión constante corriente abajo. Una presión no controlada en el hogar, puede afectar la razón combustible/aire si el hogar(1) usa tiro natural para inducir aire (2) si tiene disposición de quemadores tipo abierto (3) si usa cualquier tipo de flujo o doble conexión al través para el control de la presión tipo de la razón combustible/aire, (4) si es expuesto a fuertes vientos o (5) si tiene fugas en su línea o alrededor de las entradas ó en el hogar.

Manteniendo una presión positiva en todas las partes del hogar en todos los tiempos previene infiltración de aire frío a través de fugas en la estructura. Esto es importante en cualquier operación donde los quemadores están frecuentemente a bajo fuego mientras que el hogar está caliente, - creando un fuerte efecto chimenea. Previniendo la infiltración de aire frío no solamente se mantiene la atmósfera deseada en el hogar, también mejora la uniformidad de la temperatura para evitar enfriamiento de las partes del hogar.

#### 4.3.4. Control de flujo de la razón Gas Natural/Aire

Este sistema de control mide tanto el flujo de aire como el flujo de gas natural y ajusta el flujo de uno de ellos de acuerdo a las características de diseño. Las razones de flujo son medidas por tomas de presión detectando las presiones diferenciales a través de orificios en las líneas de aire y de combustible. Estas presiones diferenciales son transmitidas a un aparato de control que ajusta automáticamente el flujo de aire (o de gas natural) para mantener la razón deseada.

La fig. 4.7 muestra un sistema típico de este tipo. Impulsos de presión corriente arriba y abajo desde un orificio en la línea de aire actúa sobre lados opuestos de un diafragma. Impulsos desde un orificio similar en la línea de gas natural actúa sobre otro diafragma de este modo se opone a la acción del diafragma de aire.

El movimiento resultante del eje es transmitido y amplificado por un medio ya sea hidráulico, eléctrico o neumático. Esta amplificación externa actúa en una válvula de control de estrangulación en la línea de gas natural ó en la línea de aire, cualquiera no es el fluido primario (controlado

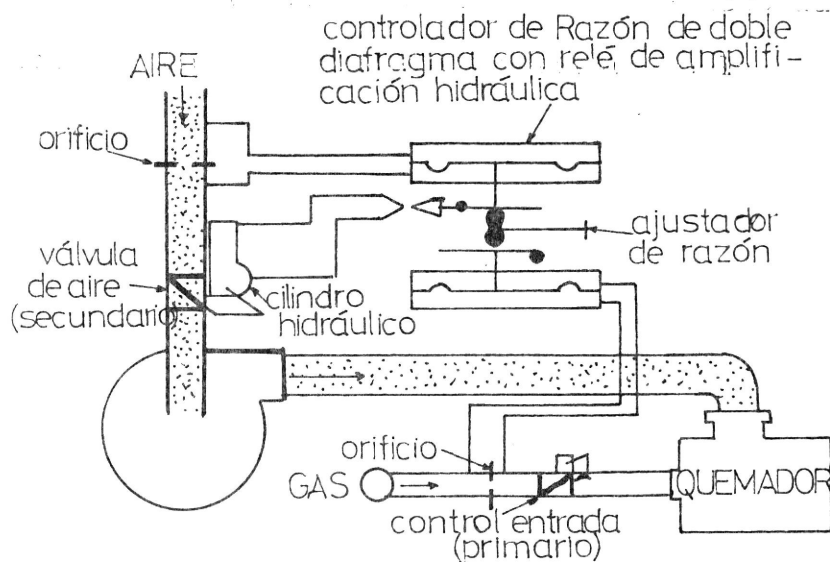


Fig. 4.7.— Diafragma directo operado por un controlador gas/aire del tipo control de flujo

por la entrada del controlador). El controlador podría contener un ajustador manual de la razón gas natural/aire para seleccionar la razón deseada.

En la fig. 4.7, se muestra un diafragma directo operado por un control gas natural/aire del tipo de control de flujo, en el cual el gas natural es el fluido primario, su flujo está controlado por un controlador de entrada. El aire es el fluido secundario, su flujo está controlado por un regulador de la razón gas natural/aire, el cual mueve la válvula de mariposa en la línea de aire hasta la diferencia de presión a través del orificio de aire (y diafragma de aire) balancea ésta a través del orificio de gas natural (y diafragma de gas). Los orificios son dimensionados de modo que la caída de presión igual corresponda a la razón correcta de los flujos de gas natural y aire. Este sistema sostiene su precisión a pesar de variar la presión de suministro o la presión del hogar.

#### 4.3.5. Controles de Seguridad

El objetivo del sistema de seguridad de combustión es el de detener el flujo de combustible si

la llama existente va a extinguirse. Si el flujo de combustible no es parado , la cámara de combustión irá a encontrar una mezcla explosiva de combustible y aire. Un quemador piloto no es suficiente protección, su flama puede irse a un lado de la mezcla de combustible/aire ó ~~tornarse~~ ~~in-~~adecuada para procurar una extinción de la flama principal prontamente , ó un piloto puede ser incapaz para extinguir la flama principal si la razón combustible/aire es demasiado rica o muy lenta, o si la atomización es pobre.

La vieja idea de que un quemador piloto constante ayuda porque éste fue siempre allí un aliviador para extinguir la flama ya ha caído en desconfianza. También muchas flamas de quemadores pilotos son inútiles para aligerar una flama principal cuando sea necesario, pero tienen un efecto de retraso para encender una acumulación explosiva de la mezcla combustible/aire. Un quemador piloto interrumpido con su período programado de ensayo para encendido es el mejor camino para evitar una explosión de encendido por un quemador piloto. Para prevenir acumulación de combustible - no quemado en una cámara de combustión, aparatos

monitores de flama podrían ser usados para gobernar las válvulas automáticas de corte de combustible. Por tanto es necesario revisar tópicos respecto al sistema de seguridad de combustión como son:

- válvulas automáticas de corte de combustible
- sistema de supervisión de válvulas.

#### 4.3.5.1. Válvulas automáticas de corte de combustible

Los primeros requisitos de cualquier válvula de corte ó cierre de combustible son de que no pueda ser manualmente abierta o cerrada, que se cierre con un gran ajuste, y que sea sensible a cualquier posible falla en el sistema. Añadiendo a ésto, es deseable tener un arreglo ó disposición manual de corte, altas ventajas mecánicas para fácil operación, y un interruptor auxiliar. En la fig. 4.8 se muestra una válvula de corte de reposición manual. Cuando el circuito de control es interrumpido el elec

tromagneto contraído sostiene la válvula abierta y un resorte fuerte cierra de golpe de modo que el flujo de combustible es parado rápidamente. Cuando la dificultad debe ser eliminada de modo que el circuito es otra vez cerrado, la válvula puede ser abierta por la acción manual mediante una palanca. Si, sin embargo, la dificultad o daño no ha sido corregida satisfactoriamente, el circuito permanece abierto y la válvula no puede ser operada por el movimiento de la palanca ya que el vástago de la válvula permanece desenganchada del manubrio. Esto es llamado válvula de corte manual de combustible bien diferenciada de la válvula automática de corte, la cual automáticamente repone y reabre cuando la energía es restaurada.

El tipo de reposición manual es usado dondequiera que la presencia de un operador es requerida para colocar un seguro, o un aliviador de fuego de baja de los que

madores.

La acción del resorte cierra la válvula cuando el electromagneto es desenergizado. Muchos modelos tienen válvulas de tipo globo. Actuando manualmente no reabrirá la válvula manual para reponer hasta que el circuito del electromagneto sea energizado. En la Izquierda: el actuador energizado o desenergizado, y la válvula cerrada.

Válvulas de corte de reposición automáti

Actuador energizado o des-energizado  
válvula cerrada      Actuador energizado  
válvula abierta      Actuador des-energizado  
válvula cerrada

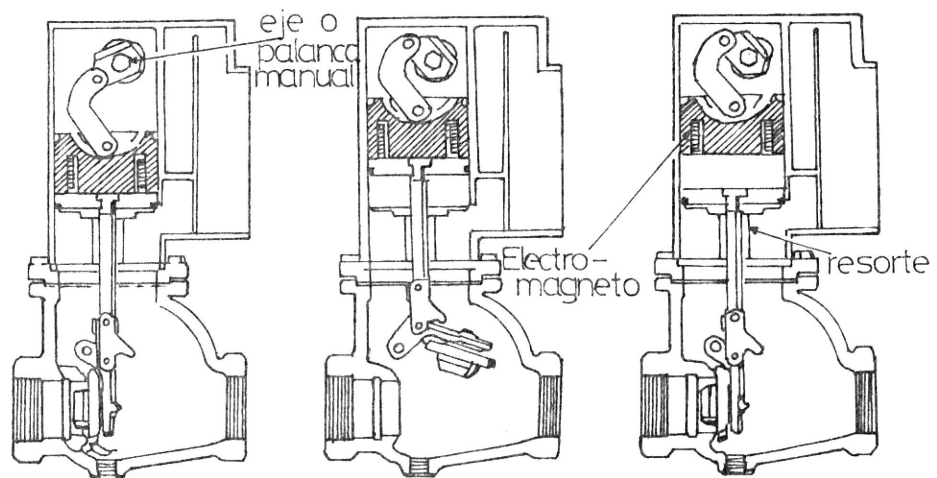


Fig. 4.8.— Operación de una válvula manual de corte de combustible

ca son usadas solamente con ciclos programados de restauración, que incluyen una pre-purga y post-purga automática y purgando con un tiempo de prueba para el encendido sobre un quemador piloto in ter rumpido monitoreado seguido por una flama principalmente monitoreada. Excepto en tamaños muy pequeños, tales como válvulas solenoides de un quemador pilo to, válvulas de tipo de reposición automática son diseñadas para abrir lentamente de modo que no hayan daños o dificultades en el equipo de regulación o en la emisión de flamas del quemador pi loto, y de forma que se procea de una flama principal transversalmente lisa.

Cualquier válvula automática de corte - (ya sea de reposición manual o automática) debería cerrar cuando la falla sea de (1) combustión ó atomización del ai re soplado (2) cualquier elemento del sistema de control de entrada (tales co mo controladores de temperatura, contro ladores de presión del vapor), (3) pre-

si3n de aire en el quemador (4) presi3n del gas en el quemador (5) corriente desde el detector de flama 6 (6) corriente desde otros aparatos de seguridad tales como un corte de agua y un corte de presi3n alta. En casos especiales all3 pueden a1adirse algunos numerales relacionados a la v1lvula de corte. La v1lvula de corte debe ser conectada en serie con todos estos elementos como se muestra en la fig. 4.9. Las presiones del gas natural, aire, y vapor pueden ser convertidas a una se1al el3ctrica por medio de fuelles, tubos de Bourdon, o diafragmas operados por interruptor.

Interrupciones moment1neas de energ3a pueden causar molestias en el cierre donde las v1lvulas de corte de seguridad tipo reposici3n manual son usadas. Si 3sto es un problema frecuente, ser1 mejor usar un aparato electr3nico conocido como una V1lvula de disparo con retraso, la cual puede ser instalada para mantener la energ3a en la v1lvula de corte de combus-

combustible por un segundo, el cual es suficientemente largo para superar una interrupción típica pero no suficientemente largo para permitir una peligrosa acumulación de combustible. Algunos sistemas supervisores de flama son también utilizables con la característica de disparo con retraso.

El circuito de la fig. 4.9 puede ser arreglado de modo que la válvula será cerrada cuando falle cualquiera de los distintos intercierres (ó interlocks) de un sistema de combustión, además inclu-

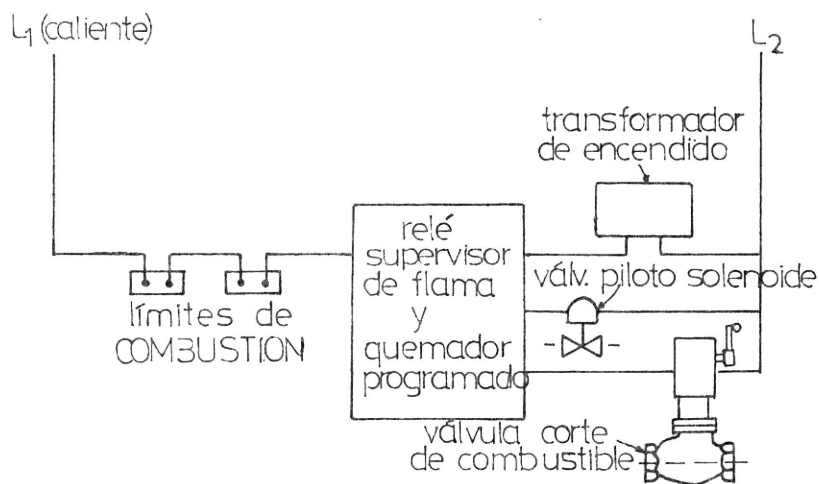


Fig. 4.9.— Disposición para una válvula automática de corte de combustible

ye un interruptor de circulación del flujo de aire, un interruptor de obstrucción de la conducción ó acarreo, y un botón final de emergencia.

A causa de que la válvula de corte de combustible afecta la acción final comandada por un sistema detector de fallas, una fuga, escape o falla en la válvula podría ser extremadamente peligrosa. Por esta razón autoridades confiables en la materia, a menudo insisten en colocar dos válvulas de corte de combustible en serie en un espacio entre ellas para venteo mediante puertas o válvulas de venteo, más la provisión de pruebas periódicas de fugas en las válvulas.

Todos los métodos de prueba de fugas consisten de algunas clases de válvulas de corte inmediatamente corriente abajo desde la válvula de corte de combustible con la previsión para detectar presión a pasos transversales entre las válvulas (como podría ocurrir si la válvula de corte

de combustible tuviera fallas). En su forma más simple la prueba de fuga utiliza una llave de purga con manguera de caucho, la parte final abierta la cual es sumergida en un cubil de agua de modo que uno puede observar burbujas de combustible formadas en el agua si existe fuga.

La mayoría de los sistemas de chequeo de fugas confiables se tratan de un aparato de chequeo programado automático, tal como el chequeador doble, el cual hace un chequeo automático después de cada cierre de la válvula de corte de combustible, usando un interruptor de presión y alarma.

#### 4.3.5.2. Sistema de válvulas supervisoras

Las explosiones de hogares a gas natural ocurren a menudo durante el encendido debido a que descuidadamente una de las válvulas de los quemadores a gas quedan abiertas luego de un cierre pre

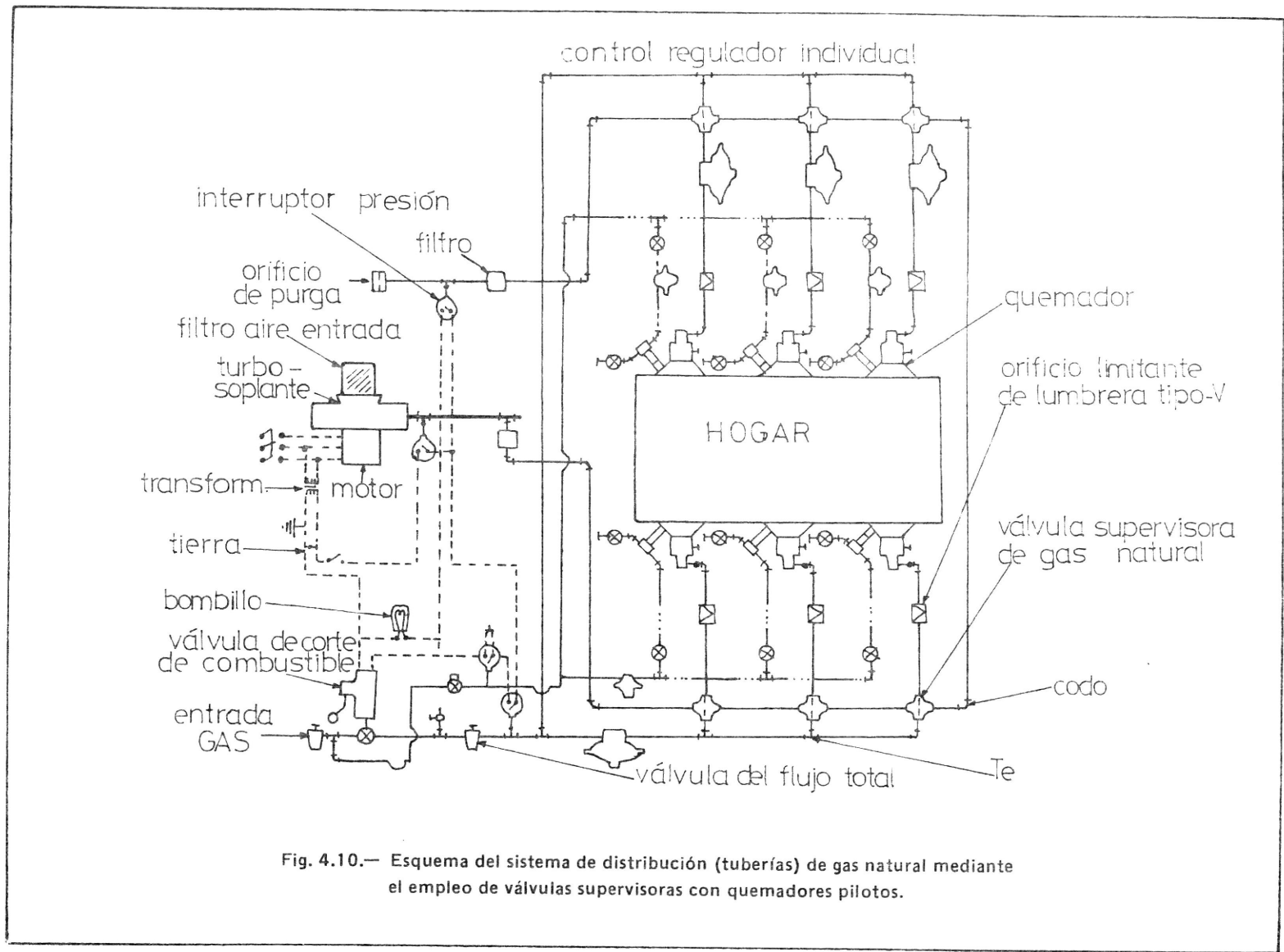
vio, permitiendo que el hogar sea llenado de combustible sea abierta. El sistema de válvulas de supervisión reduce la probabilidad de tales explosiones durante el encendido. Una válvula especial - supervisora de gas en cada quemador se taladra con un pequeño paso secundario localizado de modo que está abierto solamente cuando el paso principal es cerrado. Una presión de chequeo en la línea es conectada a través del paso secundario de todas las válvulas de gas de modo que un interruptor de presión a la salida de la línea no puede cerrar un circuito hacia la válvula de corte de combustible a menos que todas las válvulas estén cerradas. Si el operador halla que no puede abrir la válvula de corte de seguridad debido a que la válvula tiene que ser abierta de lado, él no debe cerrar solamente esa válvula, pero también él debe entender que el hogar está para ser purgado antes de encender cualquiera de los pilotos o quemadores.

Es necesario operadores entrenados adecuadamente y responsables.

La fig. 4.10, muestra la aplicación de las válvulas supervisoras para un sistema de combustión de gas en el que el aire de combustión es suministrado por un mezclador de gas tipo a chorro. Un lado del hogar muestra la tubería con reguladores individuales y el otro lado con un regulador común. (Esto es hecho para ilustrar ambos sistemas, pero ésto es improbable de que ambos puedan actuar a la vez en el mismo hogar).

Un sistema equivalente al sistema de válvulas supervisoras puede ser obtenido por el uso de interruptores finales en las válvulas de gas.

La línea de presión para chequear está reemplazada por un circuito eléctrico que es cerrado cuando todas las válvulas de combustible son cambiadas a la posición de apagado. Este método es fácilmente adaptable a válvulas de Bunker tan bien como a



válvulas de gas natural. Este sistema no sustituye el sistema de supervisión de flama, debido a que éste llega a ser universalmente usado, ellos serán reemplazados por el sistema de válvulas de supervisión.

#### 4.3.6. Sistema de Control de Quemadores

Este sistema tiene la facultad para arrancar y parar quemador(es), usando señales desde el monitor de flama, o del intercierre (interlock) de control límite, y del controlador de entrada; procura un arranque seguro por secuencia propia y por chequeo de sus componentes antes de cada arranque; chequeo para obtener una adecuada fuente de encendido y manejo de la flama principal durante la operación del quemador; cierra el quemador en secuencia propia si una condición insegura se desarrolla. Algunos sistemas de control de quemador están intercalados con otros controladores en un sistemático proceso.

Los sistemas de supervisión de flama no progra

mada consiste de uno o más aparatos de monitreo de flama y circuitos de control los cuales cuando se aplican apropiadamente proveen de las siguientes protecciones. Durante el encendido ellos sienten la presencia de una flama piloto en un lugar donde el piloto será reemplazado por el encendido del quemador principal antes de permitir que la válvula de corte de combustible principal sea energizada y operada. El encendido de la flama principal le sigue, se recomienda, de tal forma que el sistema corte la flama piloto y solamente maneje o monitoree la flama principal. En la prueba de falla de llama, el circuito de disparo, - causa que todo el combustible sea corto. La atención de un operador es necesaria antes que la flama del próximo piloto establezca un período o prueba para encender pueda arrancar. Debido a esta característica, estos sistemas son también llamados sistemas de supervisión de flama no recirculante.

Los sistemas de supervisión de flama programados son similares a los no programados pero ellos pueden también proveer funciones adicionales tales como pre-purga, post-purga, y

reposición automática sin asistencia del operador.

Los sistemas de supervisión de flamas (ya sean programados o no) aprovechan el tener no más de 4 segundos en el caso de falla de flama. Ellos pueden tener los contactos de falla de flama de tal forma que pueden colocarlos dentro de alarmas y circuitos de señales. Ellos usualmente tienen un chequeador de arranque seguro empotrado para prevenir el encendido si el relé de flama-sensible esté en la posición de flama-presente debido a la falla del componente dentro del sistema supervisor de flama o debido a la presencia de la flama simulada o actual.

Un sistema típico de supervisión de flama programada usando quemador de encendido por chispa, incluye la siguiente secuencia de encendido:

1. Provee flujo de aire; chequea que la presión de aire esté cercana al límite inferior; chequea que la presión del gas natural esté cercana al límite inferior; che-

quea que la presión del gas natural esté aba  
jo del límite superior.

- 2) Retrasa el tiempo para un mínimo de 4 cambios completos de aire en la cámara de combustión y pasos de gases combustionados.
- 3) Energiza (abre) el solenoide(s) del quemador piloto y las fuentes eléctricas de encendido.
- 4) Provee de flama al quemador piloto y tiempo externo de la fuente de encendido eléctrico - siguiendo a la flama del piloto para continuar quemando. (Si el quemador piloto no está pre visto dentro de 15 segundos, el solenoide del piloto se desenergiza y requiere reposición - manual antes de reiniciar si ésto es posible).
- 5) Energiza el circuito para permitir una apertu ra manual o automática de la válvula(s) de cor te de combustible y cierre automático de la válvula de venteo en una disposición en blo- que y venteo.
- 6) Dentro de 15 segundos después que empieza a fluír el gas natural, la(s) válvula(s) de los quemadores pilotos podrían ser desenergizados

para interrumpir a éstos.

7) Proveer la flama principal.

8) Control de la descarga en la entrada del sistema de control.

#### 4.4. MANTENIMIENTO Y LIMPIEZA DEL EQUIPO

Como se ve en los cálculos que se dan a continuación, la cantidad de gases de combustión del gas natural son un veinte por 100 menor que la que se produce con el Bunker C, pero además, se debe considerar que los productos de combustión del gas natural no contienen productos de azufre, que indica que no hay ningún peligro para los equipos componentes del sistema de combustión, o sea, para la caldera en general. En otras palabras, el siempre temido peligro de corrosión ha sido superado al usar gas natural, todo lo cual obliga a pensar que el calor que sale en los gases de combustión - podría ser mayormente aprovechado, tratando que éstos no salgan a una temperatura inferior a la temperatura de rocío, de tal forma que no se produzca humedad y de alguna manera afecte al equipo al cambiar de combustible, o sea, al usar Bunker C, o por humedad excesiva en

BEAVER

el equipo que al contacto con el oxígeno de la atmósfera va a producir corrosión por oxidación.

También se debe tener en cuenta el porcentaje de anhídrido carbónico ha variado respecto al anterior combustible, así se observa que se produce en menor cantidad lo cual es importante considerar al trabajar en operación normal, ya que un valor diferente del establecido significará una falla, error de operación.

Por tanto se puede concluir que la combustión realizada con gas natural es mucho más limpia que la realizada con Bunker C.

CALCULO REAL DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION CON GAS NATURAL (Teórico)

CARGA = 73 MW

EA = 3 %

CO<sub>2</sub> : 11.31 %

O<sub>2</sub> : 0.8 %

N<sub>2</sub> : 87.89 %

$$\text{CO}_2: 0.1131 \frac{\text{Kmol CO}_2}{\text{Kmol gas}} \times 44 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{Kmol CO}_2} = 4.98 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{Kmol gas}}$$

$$\text{O}_2: 0.008 \frac{\text{Kmol O}_2}{\text{Kmol gas}} \times 32 \frac{\text{Kg O}_2}{\text{Kmol O}_2} = 0.26 \frac{\text{Kg O}_2}{\text{Kmol gas}}$$

$$\text{N}_2: 0.8789 \frac{\text{Kmol N}_2}{\text{Kmol gas}} \times 28 \frac{\text{Kg N}_2}{\text{Kmol N}_2} = 24.61 \frac{\text{Kg N}_2}{\text{Kmol gas}}$$

---


$$29.84 \frac{\text{Kg Gas seco}}{\text{Kmol gas}}$$

$$0.1131 \frac{\text{Kmol C}}{\text{Kmol gas}} \times 12 \frac{\text{Kg C}}{\text{Kmol C}} = 1.36 \frac{\text{Kg C}}{\text{Kmol gas}}$$

$$\frac{29.84 \frac{\text{Kg gas seco}}{\text{Kg mol gas combustionado}}}{1.36 \frac{\text{Kg C}}{\text{Kmol Gas combustionado}}} = 21.99 \frac{\text{Kg gas seco}}{\text{Kg C en gas seco}}$$

$$21.99 \frac{\text{Kg Gas seco}}{\text{Kg C gas seco}} \times 0.748 \frac{\text{Kg C en combustible}}{\text{Kg combustible}} = 16.45 \frac{\text{Kg gas seco}}{\text{kg combust.}}$$

Sabemos que el peso molecular del Gas natural es:

$$16.32 \frac{\text{Kg Gas Natural}}{\text{Kg mol Gas Natural}}$$

además:

$$1 \text{ Kmol combustible} = 29 \text{ Kg aire}$$

Hago esto porque:

$$\frac{9.64 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{m}^3 \text{ G.N.}} \times 29 \frac{\text{Kg aire}}{\text{K mol GN}}}{16.32 \frac{\text{Kg GN}}{\text{Kg mol GN}}} = 17.13 \frac{\text{Kg aire teórico}}{\text{Kg GN}}$$

Por tanto

$$\frac{16.45 \times 16.32}{29} = 9.26 \frac{\text{m}^3 \text{ gas seco}}{\text{m}^3 \text{ Gas Natural}} \frac{\text{Kg gas seco}}{\text{Kg aire}}$$

a 73 MW se consumen: 22375 m<sup>3</sup> Gas Natural/hora:

$$\begin{aligned} 9.26 \frac{\text{m}^3 \text{ Gas seco}}{\text{m}^3 \text{ combustible}} \times 22.375 \frac{\text{m}^3 \text{ combustible}}{\text{hora}} \\ = 207.134 \frac{\text{m}^3 \text{ Gas seco}}{\text{hora}} \end{aligned}$$

TABLA 4.7

PRODUCTOS REALES DE COMBUSTION CON GAS NATURAL

MN	EA	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Kg. Gas seco Kg combust.	$\frac{m^3 \text{ gas seco}}{m^3 \text{ combust.}}$	$\frac{m^3 \text{ combust.}}{\text{hora}}$	$\frac{m^3 \text{ gas seco}}{\text{hora}}$
		% Gravimétrico				% volumétrico		
73	3	11.31	0.8	87.89	16.45	9.26	22.375	207.134
	4	11.17	1.1	87.73	16.65	9.37		209.652
55	7	10.86	1.55	87.59	17.1	9.62	17.598	169.349
	9	10.62	2	87.38	17.48	9.84		173.112
36	17	9.85	3.3	86.85	18.8	10.58	11.816	125.012
	20.5	9.51	4	86.49	19.45	10.95		129.334
18	75	6.37	9.5	84.13	28.77	16.19	6.662	107.862

CAPITULO V

CALCULOS COMPARATIVOS

## 5.1. DATOS

TABLA 5.1  
CENTRAL TERMICA ESTERO SALADO

REGISTRO DE OPERACION - PANEL SUPERIOR DE ARRANQUE  
CALDERA (1/4)

	GENERADOR (MW)	CALDERA M.C.R.	73 MW	55 MW	36MW	18 MW
TIRO (mm H <sub>2</sub> O)	Salida gas caliente	30	29	14	3	2
	Entrada gas caliente	100	95	60	30	23
	Hogar	185	170	105	55	40
	Caja de aire	375	355	210	125	125
	Entrada aire caliente	440	410	255	150	145
	Sello aire	470	430	260	155	150
	Tiro forzado	475	445	265	160	150
PRESION (Kg/cm <sup>2</sup> )	Domo	95	95	92	90	89
	Vapor sobrecalentado.	90	90	89	88	88
	Vapor sopladores.	0	0	0	0	0
	Agua alimentación	116	117	120	121	123
	Descarga 3A bomba	120	120	123	124	127
	agua 3B	0	0	0	0	0
	Desaerador	5.3	5.1	3.5	2.0	0.5
	Domo	99	99	95	93	92
	Vapor turbina	91	91	91	91	91
	Vapor atomización.	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1
Combustible cabezal	10	9.5	6.9	6.8	7.4	

GENERADOR (MW)	CALDERA M.C.R.	73 MW	55 MW	36 MW	18 MW
Combustible	10	9.5	7.0	6.9	7.5
Descarga 3A bomba combustible 3B	2 20	2 20	2 20	2 20	2 20
Aire atomización	6.2	6.1	6.2	5.5	5.7
Diesel	14	14	14	14	14

REGISTRO DE OPERACION - PANEL SUPERIOR DE ARRANQUE DE CALDERA ( 2/4 )

GENERADOR (MW)	CALDERA M.C.R.	73 MW	55 MW	36 MW	18 MW
Flujo vapor principal	295	285	209	140	72
Flujo combust.	18.7	17.8	14	9.4	5.3
Gas oxígeno(%)	1.1	1.1	1.5	3.3	-
Flujo aire(%)	84	81	59.5	37	29.5
Nivel domo (I)	$\pm$ 0	$\pm$ 0	$\pm$ 0	$\pm$ 0	$\pm$ 0
Nivel domo (O)	$\pm$ 0	$\pm$ 0	$\pm$ 0	$\pm$ 0	$\pm$ 0
Nivel desaerador	$\pm$ 0	- 20	$\pm$ 0	+ 30	+ 20
Ventilador tiro forzado	173	170	143	132	126
Bomba agua alimentación 3A	340	330	300	260	230
Bomba agua alimentación 3B	0	0	0	0	0

GENERADOR (MW)	CALDERA M.C.R.	73 MW	55 MW	36 MW	18 MW
Bomba condensado 3A	35	0	0	0	0
Bomba condensado 3B	0	34.5	32.5	30	28
Flujo aire	68	67	53	41	35
Flujo combust.	57	52.5	41	30	18
Flujo agua alimentación	73.5	70.5	59	45	26
Flujo agua atemperada	72	76	57.5	39	0
Vapor atemperador	370	373	384	389	413
Vapor sobrecalentado	520	520	520	520	520
Vapor principal	515	515	515	516	512
Aire salida PR. V.	95	99	97.5	101	102
Vapor salida atemperador	360	360	370	385	410
(ORSAT) Gas Oxígeno	1./1.	1.1/1.2	1.5/1.6	3/2.8	9.2/10.2

## REGISTRO OPERACION - PANEL SUPERIOR DE ARRANQUE DE CALDERA (3/4)

GENERADOR (MW)		CALDERA M. C. R.	73 MW	55 MW	36 MW	18 MW	
TEMPERATURA DEL METAL DEL SOBRE - CALENTADOR	1	381	381	380	370	410	
	Metal exterior del tubo	2	392	391	390	397	420
	Supercalentador primario	3	401	400	400	424	421
		4	413	413	412	441	418
	5	413	414	413	434	410	
	6	420	421	423	430	409	
	7	421	425	426	425	410	
	8	416	417	420	420	409	
	9	407	407	409	411	407	
	10	400	400	403	397	406	
	11	399	400	400	392	402	
	12	390	391	391	382	398	
	13	400	400	400	400	402	
	14	389	390	388	391	398	
	15	395	399	394	409	404	
	16	380	382	380	385	395	
TEMPERATURA DEL METAL DEL SOBRECALENTADOR	Metal exterior del tubo del supercalentador secundario	17	512	512	511	491	502
	18	501	500	500	533	511	
	19	514	513	516	538	510	
	20	532	533	537	526	510	
	21	521	520	525	507	506	
	22	511	513	514	501	505	

GENERADOR (MW)	CALDERA M. C. R.	73 MW	55 MW	36 MW	18 MW
23	511	511	507	506	504
24	511	511	508	484	490

## REGISTRO DE OPERACION - PANEL SUPERIOR DE ARRANQUE DE CALDERA (4/4)

GENERADOR (MW)		CALDERA M. C. R.	73 MW	55 MW	36 MW	18 MW
PRESION EN LA ENTRADA DEL QUEMADOR (Kg/cm <sup>2</sup> )	#1 Quemador Bunker/Vapor	7.9/5.0	7.5/5.0	5.5/5.0	5.4/5.0	5.9/5.0
	# 2 "	7.9/4.8	7.6/4.8	5.5/4.8	-	-
	# 3 "	8.0/4.8	7.7/4.9	5.5/4.9	5.5/4.8	6.0/4.8
	# 4 "	8.2/5.4	7.8/5.4	5.7/5.4	5.6/5.3	-
	# 5 "	8.0/5.4	7.5/5.4	5.6/5.4	-	-
	# 6 "	8.1/4.7	7.8/4.8	5.9/4.7	5.7/4.6	-
(1 <sup>a</sup> REG.) 2 REG. ANILLO REGULADOR GUIA AIRE (%)	N <sup>o</sup> 1 Quemador	100	100	100	100	100
	N <sup>o</sup> 2 "	100	100	100	100	100
	N <sup>o</sup> 3 "	100	100	100	100	100
	N <sup>o</sup> 4 "	100	100	100	100	100
	N <sup>o</sup> 5 "	100	100	100	100	100
	N <sup>o</sup> 6 "	100	100	100	100	100
	# 1 Quemador	4/6	4/6	4/6	4/6	4/6
	# 2 "	4/6	4/6	4/6	1/1	1/1
	# 3 "	4/6	4/6	4/6	4/6	4/6

TABLA 5.2

DIMENSIONES

Superficie calefacción caldera		3775 m <sup>2</sup>
<u>HOGAR</u>		
Volumen total		795 m <sup>3</sup>
Superficie calefacción efectiva	Superficie radiación 654 m <sup>2</sup> Superficie convección 321m <sup>2</sup>	975 m <sup>2</sup>
Frente :	8568 mm.	
Fondo :	9468 mm.	
Altura :	12190 mm.	
<u>SUPERCALENTADORES</u>		
S.C. Primario:	Superficie calefacción 431 m <sup>2</sup>	1351 m <sup>2</sup>
S.C. Secundario:	Superficie calefacción 920 m <sup>2</sup>	
<u>PRECALENTADOR AIRE REGENERATIVO</u>		
Superficie calefacción		11630 m <sup>2</sup>
<u>CALENTADOR AIRE A VAPOR</u>		
Superficie calefacción		610 m <sup>2</sup>
<u>VENTILADOR TIRO FORZADO</u>		
Capacidad		5100 $\frac{\text{m}^3}{\text{min.}}$
Columna estática		710 mm. H <sub>2</sub> O
Temperatura aire		24.7°C

TABLA 5.3

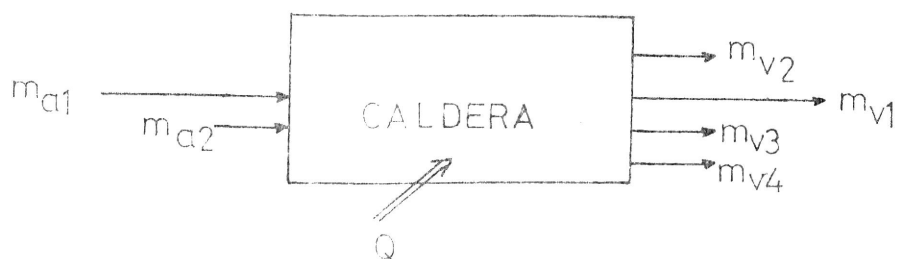
DATOS DE PRODUCCION, DISTRIBUCION Y CONSUMO DE VAPOR EN  
OPERACION NORMAL A VARIAS CARGAS

	GENERACION (MW)	73	55	36	18
$m_{a1}$	Flujo Kg/hr	284.400	206930	136.560	74.410
	Temper. °C	214.3	198.1	178.5	151.2
	Entalp. Kcal/Kg	219.8	202.5	181.9	153.7
$m_{a2}$	Flujo Kg/hr	330	1350	1200	30
	Temper. °C	154	142.5	128.2	108
	Entalp. Kcal/Kg	155.1	143.3	128.7	108.2
$m_{v2}$	Flujo Kg/hr	1420	1450	1490	1540
	Temper. °C	510	510	510	510
	Entalp. Kcal/Kg	815.6	815.6	815.6	815.6
$m_{v3}$	Flujo Kg/hr	1240	940	650	360
	Temper. °C	510	510	510	510
	Entalp. Kcal/Kg	815.6	815.6	815.6	815.6
$m_{v4}$	Flujo Kg/hr	230	230	230	230
	Temper. °C	510	510	510	510
	Entalp. Kcal/Kg	815.6	815.6	815.6	815.6
$m_{v5}$	Flujo Kg/hr	281.840	205.660	135.280	68.540
	Temper. °C	510	510	510	510
	Entalp. Kcal/Kg	815.6	815.6	815.6	815.6
$m_{v6}$	Flujo Kg/hr				3770
	Temper. °C				510
	Entalp. Kcal/Kg				815.6

## 5.2. BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA

Mediante estos balances se establecerá la cantidad de vapor aprovechable respecto al uso de cada com bustible que se utilice para producirlo. Los cálcu los se harán para distintas cargas a fin de apre- ciar la forma óptima del trabajo del sistema de combustión, es decir, con la mínima cantidad de com bustible producir una máxima cantidad de vapor de trabajo, que será utilizada en la turbina y otros usos auxiliares.

BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA: BUNKER C



$$m_{a1} h_{a1} + m_{a2} h_{a2} + Q = m_{v1} h_{v1} + m_{v2} h_{v2} + m_{v3} h_{v3} + m_{v4} h_{v4}$$

de donde:

$$m_a h_{a1} + m_{a2} h_{a2} + Q = q_1$$

$$m_{v1} h_{v1} + m_{v2} h_{v2} + m_{v3} h_{v3} + m_{v4} h_{v4} = q_2$$

$$\text{Pérdida de calor (\%)} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \times 100$$

$$Q = \dot{m}_C \text{ PCI}$$

BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA: BUNKER C73 MW

$$Q = 17800 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \times 10321,22 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} = 183'717.716 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$q_1 = 284.400 \times 219.8 + 330 \times 155.1 + 183'717.716 = 246'280.019 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$\frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \times \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \qquad \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \times \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \qquad \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$q_2 = (21.840 + 1420 + 1240 + 230) \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \times 815.6 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} = 232'227.788 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$\text{Pérdida calor} = 5.71 \%$$

55 MW

$$Q = 14000 \times 10321.22 = 144'497.080 \text{ Kcal/kr}$$

$$q_1 = 206.930 \times 202.5 + 1350 \times 143.3 + 144'497.080 = 186'593.860 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$q_2 = (205.660 + 230 + 940 + 1450) 815.6 = 169'873.168 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$\text{Pérdida calor} = 8.95\%$$

36 MW

$$Q = 9400 \times 10321.22 = 97'019.468 \text{ Kcal/hr}$$

$$q_1 = 135.560 \times 181.9 + 1200 \times 128.7 + 97'019.468 = 122'014.172 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$q_2 = (135.280 + 230 + 650 + 1490) 815.6 = 112'267.340 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$\text{pérdida calor} = 7.99 \%$$

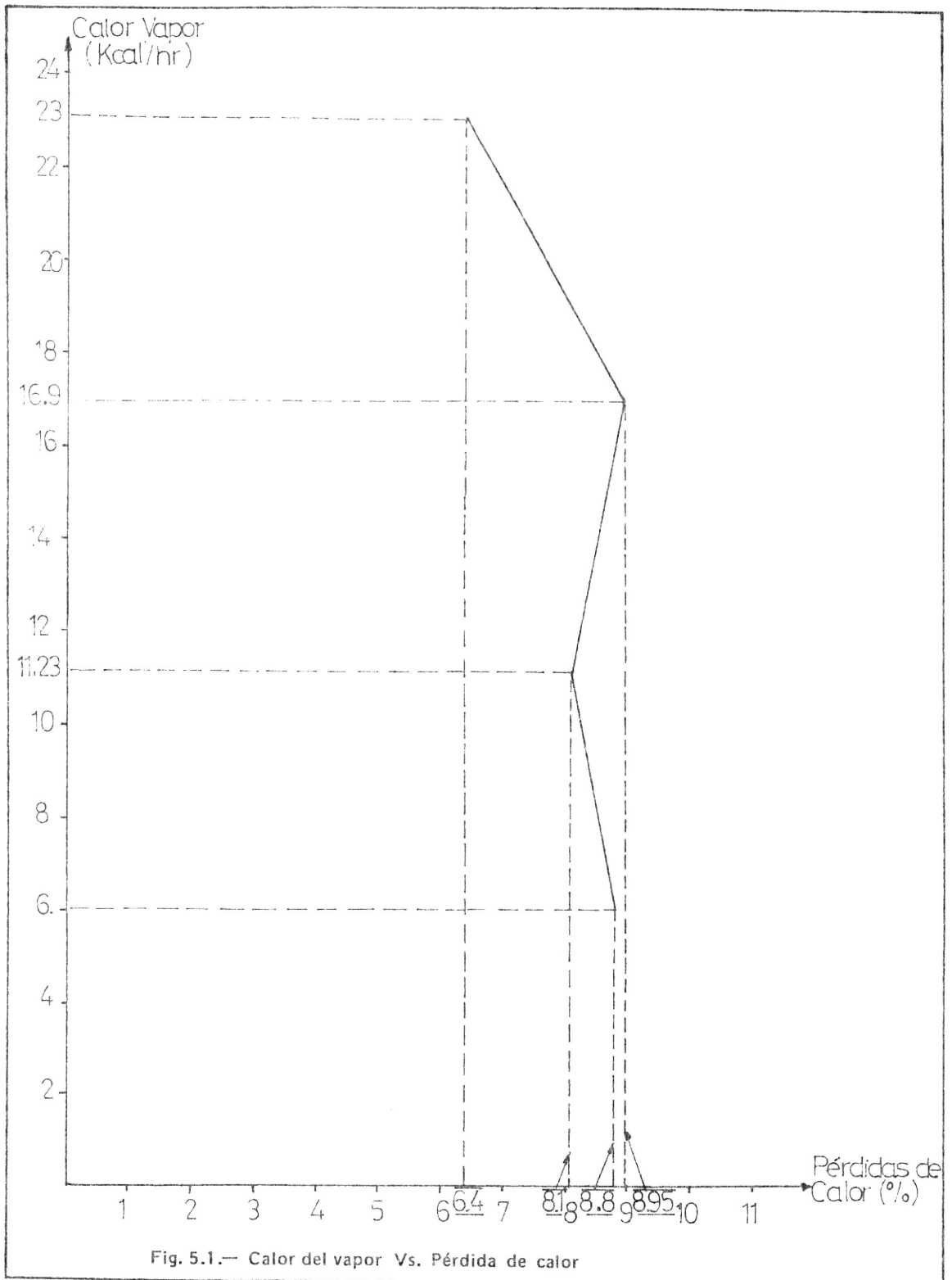
18 MW

$$Q = 5300 \times 10321.22 = 54'702.466 \text{ Kcal/hr}$$

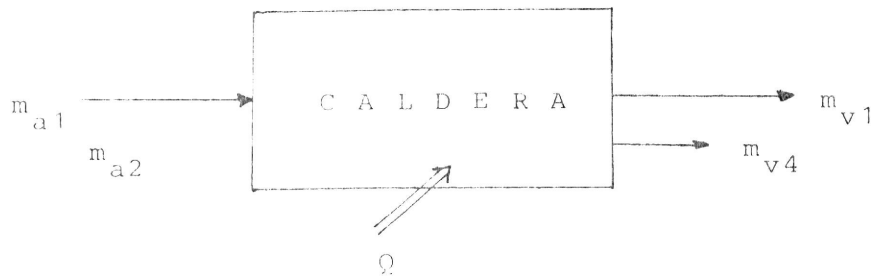
$$q_1 = 74.410 \times 153.7 + 30 \times 108.2 + 54'702.466 = 66'142'529 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$q_2 = (68540 + 230 + 360 + 1540 + 3770) 815.6 = 60'419.648 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

Pérdida calor = 8.65%



BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA: GAS NATURAL



NOTA: No es necesario vapor de atomización  
vapor para calentar combustible

$$m_{a1} h_{a1} + m_{a2} h_{a2} + Q = m_{v1} h_{v1} + m_{v4} h_{v4}$$

$$Q = m_c \text{ PCI}$$

$$q_1 = m_{a1} h_{a1} + m_{a2} h_{a2} + Q$$

$$q_2 = m_{v1} h_{v1} + m_{v4} h_{v4}$$

$$q_1 = \frac{100}{100 - \text{Pérdida calor}} \times q_2$$

$$\dot{m}_c = \frac{q_1 - (m_{a1} h_{a1} + m_{a2} h_{a2})}{\text{PCI}}$$

73 MW

$$Q = 22374.58 \times 8211 = 183'717.716$$

$$q_2 = (281.840 + 230) \times 815.6 = 230'056.292 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

interpolando de la fig. 5.1, se halla la pérdida correspondiente:

6.4 %

$$\therefore q_1 = \frac{100}{100 - 6.4} \times 230'056.292 = 245'786.636,8 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$q_1 = 284.400 \times 219.8 + 330 \times 155.1 + m_C \times 8211$$

$$m_C = \frac{245'786.636.8 - (284.400 \times 219.8 + 330 \times 155.1)}{8211}$$

$$m_C = 22.314.5 \text{ m}^3/\text{hr}$$

por tanto:

$$Q = 22314.5 \times 8211 = 183'224.333,8$$

$$q_1 = 284.400 \times 219.8 + 330 \times 155.1 + 22.314.5 \times 8211$$

$$q_1 = 245'786.636,8 \text{ Kcal/hr}$$

Lo cual representa un ahorro de combustible de 0.27 %.

55 MW

$$Q = 17.597,99 \times 8211 = 144'497.095,9 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$q_2 = (205.660 + 230) 815.6 = 167'923.884 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

interpolando de la fig. 5.1, se halla la pérdida correspondiente:

8.95 %.

$$q_1 = \frac{100}{100 - 8.95} \times 167'923.884 = 184'430.405,3$$

$$q_1 = 206.930 \times 202.5 + 1350 \times 143.3 + \dot{m}_C \times 8211$$

$$\dot{m}_C = \frac{184'430.405,3 - (206.930 \times 202.5 + 1350 \times 143,3)}{8211}$$

$$\dot{m}_C = 17.334,51 \text{ m}^3/\text{hr}$$

Por tanto:

$$Q = 17.334.51 \times 8211$$

$$q_1 = 206.930 \times 202.5 + 1350 \times 143.3 + 17.334,51 \times 8211$$

$$= 184.430.441.6$$

lo cual representa un ahorro de combustible 1.5 %.

36 MW

$$Q = 11.815.79 \times 8211 = 97'019.451,69 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$q_2 = (135.280 + 230) 815.6 = 110'521.956 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

interpolando de la fig. 5.1, se halla la pérdida correspondiente;  
8.1 %.

$$q_1 = \frac{100}{100 - 8.1} \times 110'521.956 = 120'263.281,8 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$q_1 = (136.560 \times 181.9 + 1200 \times 128.7) + \dot{m}_C \times 8211$$

$$\dot{m}_C = \frac{120'263.281.8 - (136.560 \times 181.9 + 1200 \times 128.7)}{8211}$$

$$\dot{m}_C = 11.602,55 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

por tanto:

$$Q = 11.602.55 \times 8211 = 95'268.538 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$q_1 = 136.560 \times 181.9 + 1200 \times 128.7 + 11602,55 \times 8211$$

$$= 120'263.242,1 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

lo cual representa un ahorro de combustible de 1.8 %.

18 MW

$$Q = 6662,1 \times 8211 = 54'702.503,1 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$q_2 = (68.540 + 230 + 3770) 815.6 = 59'163.624 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

interpolando de la fig. 5.1, se halla la pérdida correspondiente:

8.65 %.

$$q_1 = \frac{100}{100 - 8.65} \times 59'163.624 = 64'765.871,9 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$q_1 = 74.410 \times 153.7 + 30 \times 108.2 + \dot{m}_C \times 8211$$

$$\dot{m}_C = \frac{64'765.871,9 - (74.410 \times 153.7 + 30 \times 108.2)}{8211}$$

$$\dot{m}_C = 6494,44 \text{ m}^3/\text{hr}$$

por tanto:

$$Q = 6494,44 \times 8211 = 53'325.846,84$$

$$q_1 = 74.410 \times 153.7 + 30 \times 108.2 + 6494,44 \times 8211$$

$$q_1 = 64'765.909,84 \text{ Kcal/hr}$$

lo cual representa un ahorro de combustible de 2.52 %.

TABLA 5.4

## RESULTADOS DE BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA

	GENERACION (MW)	73	55	36	18
B U N K E R  C	Bunker C (kg/hr)	17800	14000	9400	5300
	Calor generado (Bunker) (Kcal/hr) x 10 <sup>6</sup>	246,28	186,59	122,00	66,14
	Calor absorbido (Kcal/hr) x 10 <sup>6</sup>	232,23	169,87	112,27	60,42
	Pérdida calor (%)	5.71	8.96	7.99	8.65
	Vapor atomización (Kg/hr)	1420	1450	1490	1540
	Vapor para calentar Bunker (Kg/hr)	1240	940	650	360
G A S  N A T U R A L	Vapor ahorrado (Kg/hr)	2660	2390	2140	1900
	Calor a generarse (Kcal/hr) x 10 <sup>6</sup>	245,79	184,43	120,26	64,77
	Calor a absorverse (Kcal/hr) x 10 <sup>6</sup>	230	167,9	110,5	59,16
	Combustible empleado (m <sup>3</sup> /hr)	22.314,5	17334,5	11602,5	6494,4
	Combustible ahorrado (%)	0.27	1.5	1.8	2.52

### 5.3. EFICIENCIAS

Es de gran importancia el disponer de un método rápido, sencillo y exacto para determinar la eficiencia en las calderas; para el propósito de esta tesis y para asegurar la solución de este problema que sucede a menudo en las Plantas Termo-eléctricas, se pone este método a consideración; ya que su ausencia propiciará:

- a) La posibilidad de tener pérdidas económicas de consideración por inadecuado aprovechamiento del combustible. Se debe recordar que basándose en la experiencia se ha podido establecer que en el costo total de la generación el combustible representa el cincuenta por ciento.
- b) Desconocimiento del grado de limpieza ó suciedad de la misma.
- c) La posibilidad de no aplicar correctivos oportunos.

Para subsanar los inconvenientes citados se va a establecer una ecuación con las respectivas correcciones, considerando un sinnúmero de factores como ser el calor sensible del aire, el calor sensible del combustible, lógicamente el calor de combustión en el caso del calor

suministrado al caldero, mientras que para el calor que se pierde, su cálculo considera el calor sensible de los gases de escape, calor latente del agua formada a partir del combustible.

La eficiencia es definida por la diferencia del calor - suministrado y el perdido por unidad de calor suministrado, expresada en porcentaje. Lo cual indica cómo se está aprovechando al combustible en la generación - de energía eléctrica.

### 5.3.1. Deducción de la Ecuación

Por definición:

$$= \frac{Q_s - Q_p}{Q_s} \times 100 \quad (1)$$

: eficiencia de Caldera, %

$Q_s$  : calor suministrado, base 2520 Kcal de combustible.

$Q_p$  : calor perdido, base 2520 Kcal de combustible.

$Q_s$  : calor sensible del aire + calor sensible del combustible + calor de combustión.

$$Q_S = m_a C_{pa}(1 + H_a)(T_a - 26.7) + m_c C_{pc}(T_c - 26.7) + 2520 \quad (2)$$

donde:

$m_a$  : peso del aire, Kg/2520 Kcal =  $m(1+EA)$

$EA$  : exceso de aire

$C_{pa}$  : calor específico del aire = 0.244 Kcal/Kg°C

$H_a$  : humedad del aire = 0.0132 Kg agua/Kg aire seco

$T_a$  : temperatura ambiente, °C

26.7: temperaturade referencia

$m_c$  : peso del combustible Kg/2520 Kcal

$C_{pc}$  : calor específico del combustible, Kcal/Kg°C

$T_c$  : Temperatura del combustible, °C

#### COMPOSICION DEL AIRE SECO

SUSTANCIA	PESO MOLECULAR	COMPOSICION AIRE SECON EN FRACCIONES MOLARES	PESO MOLECULAR PARCIAL EN EL AIRE SECO
Oxígeno, O <sub>2</sub>	32	0.2095	6.704
Nitrógeno, N <sub>2</sub>	28.016	0.7809	21.878
Argon, A	39.944	0.0093	0.371
Bióxido carbono, CO <sub>2</sub>	44.01	0.0003	0.013
		1.0000	28.966

Por otro lado:

$Q_p$  = calor sensible de los gases + calor latente del agua formada a partir del combustible.

$$Q_p = m_g C_{pg} (T_g - 26.7) + m_{\text{agua}} \times h_a (1 + EA)$$

donde:

$m_g$  = peso de los gases, Kg/2520 Kcal

$C_{pg}$  = calor específico de los gases, Kcal/Kg°C

$T_g$  = temperatura de los gases escape

$m_{\text{agua}}$  = Kg de agua producidos por el combustible

$h_a$  = entalpía de condensación, Kcal/Kg (es función del punto de rocío).

Estos cálculos están basados en datos de la tabla 2.10 de la sección 2.3.9.

## 5.3.2. BUNKER C

CALOR SUMINISTRADO,  $Q_S$

$$\dot{m}_C \times \text{PCS} = Q = 2520 \text{ Kcal}$$

$$\text{PCS} = 10984,76 \text{ Kcal/Kg (dato tabla 2.12)}$$

$$\dot{m}_C = \frac{2520 \text{ Kcal}}{10.984,76 \text{ Kcal/Kg}} = 0.2294 \text{ Kg Bunker C}$$

de la tabla 2.12:

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_C} = 14.0169 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg Bunker C}}$$

de donde:

$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= 14.0169 \times \dot{m}_C \\ &= 14.0169 \times 0.2294 \quad \dot{m}_a = 3.22 \text{ Kg aire} \end{aligned}$$

es decir para producir 2520 Kcal se necesitan.

$$m_C = 0.23 \text{ Kg de Bunker C}$$

$$m_a = 3.22 \text{ Kg de aire}$$

$$C_{PC} = 0.5753 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{calor específico del Bunker C dato tabla 2.12})$$

$$T_C = 104,5^\circ\text{C (dato tabla B.4)}$$

El calor suministrado  $Q_S$  se define:

$$Q_S = \dot{m}_a C_{pa} (1 + H_a) (T_a - 26.7) + \dot{m}_C C_{PC} (T_C - 26.7) + 2520$$

$$= 3.22 (1 + EA) \times 0.244 (1 + 0.0132) (T_a - 26.7) + \\ 0.23 \times 0.5753 (T_c - 26.7) + 2520$$

$$Q_s = 0.79 (1 + EA) T_a - 21.22 EA + 2509,05 \quad (2B)$$

CALOR PERDIDO,  $Q_p$ :

$$Q_p = m_g C_{pg} (T_g - 26.7) + m_{\text{agua}} \times h_a (1 + EA)$$

$m_g$  = aire del combustible + agua en aire + peso combustible

$$= m_a (1 + EA) + H_a m_a (1 + EA) + \dot{m}_c$$

$$= 3.22 (1 + EA) + 0.0132 \times 3.22 (1 + EA) + 0.2294$$

$$m_g = 3.26 (1 + EA) + 0.2294$$

$C_{pg} = 0.2515 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$  (calor específico de los gases de escape del Bunker C, dato tabla 2.12)

$T_g$  = temperatura de gases de escape,  $^\circ\text{C}$

$$m_{\text{agua}} = \frac{m_{\text{agua}}}{\dot{m}_c \text{ Bunker}} \times \frac{\dot{m}_c \text{ Bunker}}{\text{base 2520 Kcal}} = 1.0344 \times 0.2294$$

(dato sección 2.3.7)

$T_{\text{punto rocío}} = 51.3^\circ\text{C}$  (dato tabla 2.12)

$$h_a = 568.19 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \quad (\text{calor latente del agua a } T_{\text{pr}})$$

$$Q_p = 3.22 (1 + EA) + 0.2294 \times 0.2515 (T_g - 26.7) + \\ 568.19 \times 1.0344 \times 0.2294 (1 + EA)$$

$$Q_p = (0.87 + 0.81 EA) T_g + 11,66 + 113,2 EA \quad (3B)$$

reemplazando (2B) y (3B) en (1):

$$= 100 - \frac{Q_P}{Q_S} \times 100 \quad (1)$$

$$= 100 - \frac{111.66 + (0.87 + 0.81 EA)T_g + 113.2 EA}{0.79 (1+ EA)T_a - 21.22 EA + 2509,05} \times 100 \quad (4B)$$

En la tabla 5.5B se aprecian las eficiencias a distintas generaciones (MW), las cuales se obtienen a partir de la ecuación 4B.

TABLA 5.5B

EFICIENCIAS DE LA CALDERA USANDO BUNKER C A DIFERENTES GENERACIONES  
(MW)

GENERACION (MW)	EXCESO AIRE (%)	EFICIENCIAS		
		T <sub>a</sub> = 350.8°C T <sub>g</sub> = 398°C	T <sub>a</sub> = 340°C T <sub>g</sub> = 360°C	T <sub>a</sub> = 40°C T <sub>g</sub> = 170.4°C
73	3	83.14	84.31	89.47
	4.5	82.93	84.11	89.33
55	7.5	82.51	83.72	89.03
	9.8	82.19	83.42	88.81
36	17.5	81.13	82.43	88.05
	22	80.52	81.85	87.61
18	77	73.41	75.18	82.21

## 5.3.3. GAS NATURAL:

CALOR SUMINISTRADO,  $Q_S$ 

$$V_C \times PCS = Q = 2520 \text{ Kcal}$$

$$PCS = 9112,37 \text{ Kcal/m}^3 \quad V_C = \frac{2520 \text{ Kcal}}{9112,37 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^3}} = 0.2765 \text{ m}^3$$

$$m_C = P_C V_C \quad c = 1.24 \text{ Kg/m}^3 \text{ (dato tabla 2.12)}$$

$$m_C = 1.24 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0.2765 \text{ m}^3 = 0.3429 \text{ Kg}$$

$$\frac{m_a}{m_C} = 17.13 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg gas nat.}} \quad m_a = 5.8739 \text{ Kg}$$

$$C_{pC} = 0.52 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C} \text{ (dato tabla 2.12)}$$

$$T_C = 20^\circ\text{C} \text{ (dato dise\~{n}o, referencia C.13)}$$

$$Q_S = \dot{m}_a C_{pa} (1 + H_a) (T_a - 26.7) + m_C C_{pC} (T_C - 26.7) + 2520$$

$$= 5.87 (1 + EA) \times 0.244 (1 + 0.0132) (T_a - 26.7) +$$

$$0.3429 \times 0.52 (T_C - 26.7) + 2520$$

$$Q_S = 1.45 (1 + EA) T_a - 38.77 EA + 2480,03 \quad (2EN)$$

CALOR PERDIDO,  $Q_p$ :

$$Q_p = m_g C_{pg} (T_g - 26.7) + m_{\text{agua}} \times h_a (1 + EA)$$

$m_g$  = aire del combustible + agua en el aire + peso combustible

$$= m_a (1 + EA) + H_a m_a (1 + EA) + m_c$$

$$= 5.87 (1 + EA) + 0.0132 \times 5.87 (1 + EA) + 0.3429$$

$$m_g = 5.95 (1 + EA) + 0.3429$$

$$C_{pg} = 0.2652 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C} \quad (\text{dato tabla 2.12})$$

$T_g$  = temperatura de gases de escape,  $^\circ\text{C}$

$$m_{\text{agua}} = \frac{m_{\text{agua}}}{m_{\text{gas nat}}} \left| \begin{array}{l} \text{dato} \\ \text{sección 2.3.8} \end{array} \right. \times \begin{array}{l} m_c \text{ gas nat.} \\ \text{base 2520 Kcal} \end{array} = 2.22 \times 0.3429$$

$$T_{\text{punto rocío}} = 60.82^\circ\text{C} \quad (\text{temperatura saturación para Gas Natural})$$

$$h_a = 562.66 \text{ Kcal/Kg} \quad (\text{calor latente agua a } T_{pr})$$

$$Q_p = 5.95 (1 + EA) + 0.3429 \times 0.2652 (T_g - 26.7) +$$

$$562.66 \times 2.22 \times 0.3429 (1 + EA)$$

$$Q_p = (1.67 + 1.58 EA) T_g + 386.19 EA + 383.76 \quad (3GN)$$

reemplazando (2GN) y (3GN) en (1);

$$= 100 - \frac{Q_p}{Q_s} \times 100 \quad (1)$$

$$= 100 - \frac{(1.67 + 1.58 EA) T_g + 386.19 EA + 383.76}{1.45 (1 + EA) T_a - 38.77 EA + 2480,03} \times 100 \quad (4GN)$$

En la tabla 5.5 GN se aprecian las eficiencias a distintas generaciones (MW) a partir de la ecuación (4 GN).

TABLA 5.5 GN

EFICIENCIAS DE LA CALDERA USANDO GAS NATURAL A DIFERENTES  
GENERACIONES (MW)

GENERACION (MW)	EXCESO DE AIRE (%)	EFICIENCIAS (%)		
		T <sub>a</sub> = 350.8°C T <sub>g</sub> = 398°C	T <sub>a</sub> = 340°C T <sub>g</sub> = 360°C	T <sub>a</sub> = 40°C T <sub>g</sub> = 170.4°C
73	3	64.07	66.06	72.90
	4	63.79	65.79	72.64
55	7	62.95	65.00	71.87
	9	62.40	64.47	71.36
36	17	60.21	62.39	69.10
	20.5	59.27	61.49	68.42
18	75	45.84	48.66	54.05

## CAPITULO VI

### DISCUSION DE RESULTADOS

#### 6.1. ANALISIS TECNICO COMPARATIVO DE LOS DOS SISTEMAS

Este análisis es de fundamental importancia al considerar el proyecto de un nuevo sistema que reemplace al anterior, como es el caso del sistema de combustible mediante Gas Natural. En los capítulos precedentes a éste, se ha visto cómo se produce los gases de combustión en el caso de la combustión de cada combustible y su influencia en el funcionamiento de la planta.

En la tabla 2.9, se aprecia las proporciones gravimétricas de cada combustible, y en el caso del Bunker C, se tiene valores de azufre, vanadio, etc. los cuales al combinarse con el oxígeno del aire forman compuestos muy peligrosos para la vida de la instalación misma, lo cual no sucede con el Gas Natural, siendo ésta una de sus mayores ventajas; en la tabla 2.9, se observa además la cantidad de hidrógeno presente en cada combustible, la cual es mayor en el caso del Gas Natural, lo cual significa que una mayor cantidad de calor latente del agua de vaporización se escapa al exterior sin ser aprovechada, resultando en una disminución de la eficiencia de

la unidad como se puede apreciar en las tablas 5.5B y 5.5 GN, siendo ésta una desventaja en el caso del Gas Natural, la cual no es significativa.

Por las razones de composición química del Bunker C expuestas, los gases de combustión abandonan la unidad por la chimenea a una alta temperatura,  $170.4^{\circ}\text{C}$ , la cual se aprecia en la tabla B.4, tratando en lo posible de que esta temperatura sea tan alta que no se caiga en la falla de que aquella sea menor que la temperatura de punto de rocío de los gases de combustión, y ya que este valor es más alto para los componentes peligrosos mencionados (caso Bunker C), entonces se tiene que forzosamente los gases de combustión deben salir a esa temperatura tan alta, lo cual indudablemente significa un desperdicio de energía térmica.

Mientras que en el caso del Gas Natural esta temperatura de salida de los gases de combustión puede ser disminuída considerablemente sin peligro de que afecte a los elementos metálicos de la planta, será superior ligeramente a la temperatura del punto de rocío, como se analizará más adelante.

Al utilizar Bunker C como combustible es necesario pa-

sar por un sinnúmero de procesos antes de hacerlo. Pro  
cesos tales como desde el desembarco a través de los  
muelles y conducirlo por tuberías al tanque grande de al  
macenamiento, es necesario calentarlo mediante vapor,  
así como también al distribuirlo a los tanques diarios  
de consumo, luego se lo bombea con una temperatura de  
40°C a los calentadores de combustible, en donde me-  
diante vapor se eleva su temperatura hasta alrededor de  
los 100°C, con la presión que posee llega a los quem-  
adores listo para su utilización, para lo cual hay que  
agregar vapor para atomizar el combustible y poder e-  
fectuarse el trabajo del quemador en el hogar, al com-  
binarse con el aire para la combustión misma.

Cada 8 horas es necesario poner en funcionamiento el  
sistema de sopladores de hollín, mediante el uso de va  
por con el fin de mantener limpias las superficies del  
hogar y que la conversión de energía se efectúe eficien  
temente.

Como se puede deducir todo este laborioso trabajo de ma  
nejo, manipuleo, bombeo, distribución y utilización del  
Bunker es muy tedioso y requiere una dedicación constan  
te del personal de planta. Además que se deberán preocu  
par por la limpieza de los filtros tanto en los calentau

dores de combustible, como del flujómetro, como de las bombas lo cual aumenta considerablemente el trabajo y el gasto de mantenimiento y operación. Es necesario, además contar con personal apropiado que se encargue de medir la cantidad de combustible que se adquiere al proveedor.

Si bien es cierto que en el funcionamiento actual de la planta, el personal tanto de ingenieros como de trabajadores, están habituados y familiarizados con la marcha del sistema, también es necesario reconocer que se efectúa un trabajo bastante laborioso y pesado que en caso de falla humana conduce a consecuencias peligrosas y antieconómicas, ya debido a fatiga o a la intensidad misma del trabajo.

En el caso del Gas Natural, observando en la tabla 2.9, no se encuentra azufre, ni vanadio, razón por la que la combustión se realizaría en una forma muy limpia, y con la seguridad de que el material metálico de las instalaciones de la caldera no serán afectadas, de ahí que como ya se dijo, la temperatura de los gases de escape podría ser disminuída de modo considerable, de tal forma que se aprovecharía el calor que sale con ellas aumentando la eficiencia de la caldera. Pero este punto, de

mucha importancia por cierto, debe ser tratado más a fondo, de tal forma que se establecería nuevos parámetros de trabajo del calentador de aire regenerativo, razón por la cual se deja a opción de alguna persona interesada en el tema llevarlo a feliz culminación. En la tabla 2.9, se puede además apreciar el porcentaje de hidrógeno, el cual sí incurre en mayor formación de agua que para el caso del anterior combustible, lo que origina que una mayor cantidad de calor latente de agua formada a partir de este porcentaje escape sin ser aprovechada, razón poderosa para comenzar el estudio de nuevos parámetros de trabajo para el calentador regenerativo. Este calor así escapado, influye disminuyendo la eficiencia de caldera, pero lo cierto es que el trabajo de generar la misma cantidad y calidad de energía eléctrica que con el combustible anterior, no varía, no sufre ninguna modificación. Por el contrario, da la oportunidad para pensar en aprovechar mejor ese calor. Debido a la composición del Gas Natural, la temperatura de los gases de escape si puede ser bajada sin peligro de condensación de elementos nocivos y peligrosos como ya se dijo, aún sabiendo que la temperatura de punto de rocío es mayor que la misma temperatura en el caso del Bunker.

Es necesario, tomar en cuenta que para la utilización del Gas Natural, no es necesario someterlo a preparación o calentamiento, y gastar cantidades de vapor que representan un desembolso económico como ya se podrá apreciar en la sección siguiente. Por esta misma razón no es necesario usar equipos adicionales de preparación de combustible como en el caso del Bunker, ni tampoco utilizar más personal del necesario, que abarque los suprimidos equipos adicionales.

Por otro lado, la combustión del Gas Natural es muy limpia y sus productos de combustión no se producen en tanta cantidad como en el caso del combustible anterior, lo cual representa gran ventaja ya que los elementos sopladores de hollín no serán usados con tanta frecuencia, además que en este combustible no es necesario usar vapor, sino simplemente aire lo suficientemente caliente para un eficiente trabajo, que representa otra ventaja.

Con el uso del Gas Natural como combustible en la generación de energía eléctrica, se debe contar con personal idóneo, suficientemente responsable para controlar de manera exacta los parámetros que sirven para el sistema de combustión, ya que de lo contrario se conduciría a situaciones peligrosas que con estas

recomendaciones se pueden evitar.

Desde el punto de vista técnico, se han podido establecer condiciones de funcionamiento del sistema de Caldera con el Gas Natural, resultando como ya se dijo combustión limpia lo que implica menor gasto de vapor que sea introducido en los sopladores de hollín para proceder a la limpieza del hogar, aunque esta limpieza también puede ser hecha mediante aire. No se requerirá vapor para calentamiento en las tuberías de circulación del combustible, y para su calentamiento mismo como sucede en el caso del Bunker; no se necesita reservorio de almacenamiento. Además presenta la gran perspectiva de que pueda ser aumentado su aprovechamiento, es decir, que la temperatura de los gases de escape se la baje a un valor mucho menor que en el caso del Bunker. Por otro lado el mantenimiento a darse no será hecho con tanta frecuencia como en el caso del Bunker, lo cual representa la no salida de línea de la unidad, que quiere decir un gran ahorro, ya que cada salida es muy costosa.

Con todos estos puntos expuestos, se podrá apreciar la gran ventaja económica que representa el uso del Gas Natural como combustible, mediante consideraciones técnicas.

Técnicamente, el trabajo a realizarse en el sistema de combustión mediante Gas Natural, resulta mucho más sencillo, más simplificado y menos laborioso, es decir, más aliviado pero eso sí de más responsabilidad que con el Bunker C, a pesar que en caso de detectarse condiciones peligrosas los equipos se desconectan para evitar que se agrave el peligro mediante los equipos de instrumentación adecuados que ya mencionó en el capítulo 4.

Es importante señalar que la combustión con Bunker C, implica mucha cantidad de impurezas como ya se ha dicho, que ocasionan frecuentes salidas de línea del sistema para dar mantenimiento a tal o cual objetivo o componente del sistema de generación.

Como ya se vió en la sección correspondiente a eficiencias de combustión, en el caso del Bunker ésta es mayor que en el de Gas Natural lo cual quiere decir que para una misma cantidad de calor a producirse, se necesita mayor combustible para éste último, sin embargo en el presente proyecto no se ha analizado mayormente este factor por no ser objeto del mismo, todo lo cual es un argumento muy fuerte para la elaboración de un nuevo proyecto ésto es la consideración de las eficiencias y de todos los consumos de vapor que se ahorran -

usando Gas Natural, analizando incluso la posibilidad de mayor recuperación de calor, disminuyendo la temperatura de salida de los gases de combustión.

## 6.2. ANALISIS ECONOMICO COMPARATIVO DE LOS DOS SISTEMAS

En cualquier inversión de magnitud considerable, el aspecto económico es de trascendental importancia, como es el caso de la implementación del sistema de combustión elaborada en esta tesis.

Por datos proporcionados en CEPE se conoce que el precio del galón de Bunker C es de S/. 7.00 (siete sucres), el cual es un precio especial para la C.E.S., por ser ésta una empresa estatal y de servicio público. Mientras que en el mercado internacional el precio del galón de Bunker oscila en S/. 30.95  $\pm$  10% - (Treinta sucres con noventa y cinco centavos), debido a las reglas de oferta y demanda que rigen este mercado.

En los próximos cálculos se va a hacer una comparación de la cantidad de calor que tiene un galón de Bunker (del cual ya se sabe su costo) y la que tiene un m<sup>3</sup> de Gas Natural, de tal forma que por comparación de

la cantidad de calor obtener el precio del  $m^3$  de Gas Natural. Ya que en CEPE no se dispone todavía de un precio actual para este combustible, por no estar aún en producción los pozos de Gas Natural.

En esta forma se van a obtener los precios actualizados del Gas Natural tanto a nivel nacional como internacional.

Del balance de materia y energía realizado en la sección 5.2 se obtienen los valores de combustible a consumirse, es decir, con Gas Natural, para las diferentes generaciones de la unidad. También es necesario considerar que ésta no siempre funciona a máxima carga, ano ser en las horas pico, ésto es alrededor de las 19h00. horas, determinadas horas del día, mientras que en ocasiones se presentan las llamadas horas valle, en las que la carga disminuye, o sea, en las madrugadas, fines de semana, días festivos. Por tanto se ha considerado funciona a una carga promedio de 65 MW, mediante interpolación de vapores de combustible consumido a esa carga, tanto para Bunker como para Gas Natural.

En los cálculos también se obtendrán los valores de

las kilocalorías por sucre que cada combustible entrega al precio dado por unidad de volumen de combustible a consumirse.

DETERMINACION DEL PRECIO DEL  $m^3$  DE GAS NATURAL EN FUNCION DE LAS KILOCALORIAS PRODUCIDAS A PARTIR DEL PRECIO DEL GALON DE BUNKER. PRECIO DE MERCADO INTERNO (Especial para INECEL).

BUNKER

$$1 \text{ Kg} \times \frac{1 \text{ t}}{0.95 \text{ Kg}} \times 0.2642 \frac{\text{gal}}{\text{t}} = 0.2781 \text{ gal}$$

$$\text{PCI} = 10321,22 \text{ Kcal/Kg} \times \text{Kg}/0.2781 \text{ gal}$$

$$1 \text{ galón produce} = 37.113,34 \text{ Kcal}$$

$$\text{Precio del galón} = 7.00 \text{ sucres}$$

Por tanto se tiene:

$$1 \text{ galón produce } 37.113,34 \text{ Kcal cuesta } 7.00 \text{ sucres}$$

$$\text{es decir } 5301.91 \frac{\text{Kilocalorías}}{\text{sucre}}$$

GAS NATURAL

$$\text{PCI} = 8211.09 \text{ Kcal}/m^3$$

$$\text{o sea } 1 \text{ m}^3 \text{ produce } 8211.08 \text{ Kcal}$$

COMPARACION Y OBTENCION DEL PRECIO DEL m<sup>3</sup> DE GAS NATURAL

1 galón produce 37113,34 Kcal    cuesta    7.00 sucres

1 m<sup>3</sup> produce 8211.08 Kcal    cuesta    X    =

Precio del m<sup>3</sup> de Gas Natural = 1.55 sucres

por tanto:

1 m<sup>3</sup> produce 8211.08 Kcal debe costar 1.55 sucres

es decir    5297,47    Kilocalorías  
  sucre

DETERMINACION DE LAS KILOCALORIAS POR SUCRE DE ACUERDO  
AL PRECIO INTERNACIONAL: BUNKER C. MERCADO INTERNACIONAL

El precio del Bunker en el ámbito internacional está oscilando continuamente de acuerdo a las reglas de la oferta y la demanda que haya del residuo. Luego de revisar algunos valores mensuales se ha establecido un promedio, el cual se considera con un 10% de oscilación, este precio es de:

1300 sucres + 10%    el barril

30.95 sucres + 10% el galón

1 galón produce 37.113,35 Kcal cuesta 30.95 sucres

es decir  $1199,14 + 10\%$   $\frac{\text{Kilocalorías}}{\text{sucres}}$

Comparando con el precio del galón de Bunker en el Mercado Interno se aprecia que en el caso del precio internacional se producen menos kilocalorías por sucres - en una proporción de  $4.42 + 10\%$ .

DETERMINACION DEL PRECIO DEL m<sup>3</sup> DE GAS NATURAL EN FUNCION DE LAS KILOCALORIAS PRODUCIDAS A PARTIR DEL PRECIO DEL GALON DE BUNKER C. MERCADO INTERNACIONAL

BUNKER C:

1 Kg 0.2781 gal : PCI = 10321,22 Kcal/Kg

1 galón produce 37113,34 Kcal cuesta 30.95 + 10% sucres

es decir  $1199,14 + 10\%$   $\frac{\text{Kilocalorías}}{\text{sucres}}$

como ya se estableció

GAS NATURAL

PCI = 8211.08 Kcal/m<sup>3</sup>

1 m<sup>3</sup> produce 8211.08 Kcal ¿Cuánto cuesta?

COMPARACION EN FUNCION DE LAS KILOCALORIAS

1 galón Bunker produce 37113,34 Kcal cuesta 30.95+ 10% sucres

1 m<sup>3</sup> Gas Nat. produce 8211.08 Kcal cuesta X =

Precio del m<sup>3</sup> de gas natural = 6.85 sucres

es decir  $1198.7 \pm 10\% \frac{\text{Kilocalorías}}{\text{sucres}}$

PRECIO EN LAS CONDICIONES QUE C.E.P.E. ENTREGA A INECEL:

$$S/. 6.85 \times \frac{30.54 \text{ Kg/m}^3 \text{ a } 600 \text{ psig}}{3.05 \text{ Kg/m}^3 \text{ a } 50 \text{ psig}} = 68.59 \text{ sucres} \\ (= 2.08 \text{ dólares})$$

En los cálculos anteriores se observa como en el caso del Bunker C se obtiene un 0.08% más kilocalorías por sucre que con el Gas Natural en el caso del precio nacional y 0.04% en el internacional. A pesar de estas diferencias que significan un aumento relativo en costo del valor del m<sup>3</sup> de Gas Natural, aumento que no es representativo pero mediante esta comparación de kilocalorías producidas por cada unidad de volumen de combustible usado o a usarse permite obtener el precio del m<sup>3</sup> de Gas Natural, en caso de que éste ya estuviese en producción. De esta forma, se puede tener una idea más concreta de los costos de generación eléctrica usando ya -

sea uno u otro combustible como se verá en los cálculos que están en las páginas siguientes.

En CEPE se han realizado estudios que han permitido fijar el precio del  $m^3$  de Gas Natural para el año 1985, en que se piensa que este combustible esté en producción y disponible para su uso, el cual es de US\$ 3.38 el  $m^3$  de Gas Natural a una presión de 600 psig ( $42.19 \text{ Kg/cm}^2\text{g}$ ), el mismo que llevado a las condiciones de uso en la CES, ésto es a 50 psig ( $3.52 \text{ Kg/cm}^2\text{g}$ ), da un costo de S/.11.14 sucres como se describe en los cálculos que aparecen luego.

Indudablemente este valor (11.14 sucres) es bastante alto si se compara al obtenido en los cálculos anteriores, (6.85 sucres), es decir un aumento de 38.5% en el valor actual obtenido por comparación. Se entiende que en el precio dado por CEPE (US\$ 3.38), se contempla la espiral inflacionaria que afecta al mundo, la tendencia alcista del dólar, y un sinnúmero de factores económicos, como también amortizar en parte la deuda contraída por esa entidad en la explotación, investigación, arrendamiento de maquinarias, personal empleado, instalación del sistema de explotación, su costo mismo, y finalmente el transporte, distribución del Gas Natural, va

lores inmensos que seguramente serán financiados para muchos años contando además con la venta del combustible.

DETERMINACION DE LAS KILOCALORIAS POR SUCRE DE G.N.ACUERDO  
CON EL PRECIO INTERNACIONAL (Para 1985)

MERCADO INTERNACIONAL

CONDICIONES DEL GAS NATURAL

PARAMETROS	COMPRA	CONSUMO
Presión psig	600	50
Kg/cm <sup>2</sup> g	42.19	3.52
Temperatura °C	20	20
Poder calorífico		
Kcal/m <sup>3</sup>	8211.08	8211.08
Kcal/Kg	268.86	2692.16
Densidad Kg/m <sup>3</sup>	30.54	3.05
Gravedad específica	0.56	0.56

Precio internacional (año 1985): 3.38 US \$/m<sup>3</sup>

Conversión moneda: 33 sucres/dólar

$$3.38 \frac{\text{dólares}}{\text{m}^3} \times \frac{33 \text{ sucres}}{\text{dólar}} \times \frac{3.05 \text{ Kg/m}^3 \text{ a } 50 \text{ psig}}{30.54 \text{ Kg/m}^3 \text{ a } 600 \text{ psig}} = 11.14 \frac{\text{sucres}}{\text{m}^3}$$

1 m<sup>3</sup> produce 8211 Kcal cuesta 11.14 sucres

es decir    737.08     $\frac{\text{Kilocalorías}}{\text{sucre}}$

comparando con el precio del  $\text{m}^3$  de Gas Natural obtenido para el Mercado Interno se aprecia que en el caso del precio internacional se producen menos kilocalorías por sucre en una proporción de 7.19.

En la tabla 6.1 se puede apreciar los costos por unidad de volumen de cada combustible, así como también las kilocalorías que dan por sucre. En el caso del Gas Natural se observa el precio dado por CEPE para el año 1985 el cual es excesivamente alto para aplicarlo actualmente, valor debido a las razones anotadas en las páginas anteriores de esta misma sección.

Se aprecia la diferencia de costos entre el precio a nivel internacional y a nivel nacional, las cuales son del mismo valor cuando se trata del valor referencial al año 1982, es decir valor obtenido por comparación de las kilocalorías respecto del Bunker como ya se explicó. Es importante considerar este porcentaje de diferencia, ya que significa lo que el país pierde al usar cualquiera de estos combustibles en la generación eléctrica en lugar de venderlo en el mercado internacional. Siendo este

TABLA 6.1

## CUADRO COMPARATIVO DE COSTOS DE COMBUSTIBLE

COMBUSTIBLE		BUNKER C (galón)	GAS NATURAL		
			(m <sup>3</sup> )		
			VALOR REFERENCIAL (1982)	VALOR (1985)	
M E R C A D O	NACIONAL	PRECIO (sucres)	7.00	1.55	
		$\frac{\text{Kilocalorías}}{\text{Sucre}}$	5301.91	5297.47	
	INTERNACIONAL	PRECIO (sucres)	30.95 + 10%	6.85 + 10%	11.14
		$\frac{\text{Kilocalorías}}{\text{Sucre}}$	1199.14+10%	1198.7+10%	737.08
		Diferencia de costos (%)	77.38	77.38	86.09

porcentaje igual en ambos combustibles, se va a establecer las cifras que dan este valor, y apreciar la diferencia en sures de un combustible respecto del otro, tanto a nivel nacional como a nivel internacional, lo que permite establecer la factibilidad de instalación del nuevo sistema. Es decir, se va a establecer la pérdida o el ahorro de generar electricidad ya sea con uno u otro combustible.

En el caso del precio por  $m^3$  de Gas Natural dado por CEPE para el año 1985 a nivel internacional, nos sirve para tener una idea del incremento que se tendrá en el precio de los combustibles, en general. Para que este dato sea más provechoso a estos cálculos, se debería tener además, los precios a nivel nacional e internacional del Bunker y a nivel nacional del Gas Natural para ese año (1985).

Considerando las horas pico y las horas valle (se concluyen entre las primeras las horas de mayor demanda como a las 19h00 y en las segundas las de menor demanda - como fines de semana, fiestas, etc.)

Por lo tanto se ha establecido que la unidad tiene una generación promedio de 65 MW.

BUNKER C

a 73 MW	consume	17.800 Kg/hr
a 65 MW	consume	?
a 55 MW	consume	14.000 Kg/hr

de donde se obtiene que a 65 MW se consume 16111,11 Kg/hr  
o sea:

4480,5 galones/hora

en un año (345 días): 37'098.537,44 galones.

GAS NATURAL

a 65 MW se consumen 20101,17 m<sup>3</sup>/hr  
en 1 año (345 días): 166'437.687,6 m<sup>3</sup>

el año se considera de 345 días considerando salidas  
de línea por motivos de mantenimiento o falla que en  
el lapso de un año ocurren.

DETERMINACION DE LA PERDIDA QUE REPRESENTA USAR EL  
BUNKER C COMO COMBUSTIBLE EN C.E.S. EN VEZ DE NE-  
GOCIARLO EN EL MERCADO INTERNACIONAL.

a 65 MW se consumen 4480.5 galones/hora  
37'098.537,44 galones/año

Valor anual al 1'148.199.734 sucres  
precio internacional: 34'793.931,31 dólares

mientras que al precio nacional se tiene:

Valor anual 259'689.762,1 sucres  
precio nacional: 7'869.386,73 dólares

La pérdida es de:

888.509.971,9 sucres  
26'924.544,6 dólares

lo cual es el 77.38 %

DETERMINACION DE LA PERDIDA QUE REPRESENTARIA USAR EL  
GAS NATURAL COMO COMBUSTIBLE EN C.E.S. EN VEZ DE NEGOCIAL  
EN EL MERCADO INTERNACIONAL.

VALIDO PARA 1982

a 65 MW se consumen: 20101.17 m<sup>3</sup>/hr  
166'437.687.6 m<sup>3</sup>/año

Valor anual al 1'140.098.160 sucres  
precio internacional : 34'548.429,09 dólares  
(año 1982)

mientras que al precio nacional se tiene:

Valor anual al 257'978.415.8 sucres  
precio nacional: 7'817.527,75 dólares

La pérdida es de 882'119.744,3 sucres  
26'730.901,34 dólares

lo cual es el 77.38 %

DETERMINACION DE LA PERDIDA QUE REPRESENTARIA USAR EL  
GAS NATURAL COMO COMBUSTIBLE EN C.E.S. EN VEZ DE NEGOC-  
CIARLO EN EL MERCADO INTERNACIONAL.

VALIDO PARA AÑO 1985

a 65 MW se consumen: 20101.17 m<sup>3</sup>/hr

166'437.687,6 m<sup>3</sup>/año

Valor anual al 1.854'115.890 sucres

Precio internacional: 56'185.328,48 dólares

(año 1985)

mientras que al precio nacional se tiene:

Valor anual al 257'978.415,8 sucres

precio nacional: 7'817.527.75 dólares

La pérdida es de 1'596.137.424 sucres

48'367.800,73 dólares

Lo cual es el 86.09%

Este cálculo se ha realizado por pura apreciación más se lo considera como no-significativo ya que el precio del m<sup>3</sup> a nivel internacional se lo da para el año 1985 mientras que a nivel nacional se lo tiene para este año en curso. Así que el porcentaje de diferencia nos permite apreciar la extraordinaria diferencia de precios en los años dados.

DETERMINACION DEL AHORRO QUE REPRESENTA EL PRODUCIR  
ENERGIA ELECTRICA USANDO GAS NATURAL COMO COMBUSTIBLE  
EN VEZ DEL BUNKER C: MERCADO NACIONAL.

Como ya se ha hecho anteriormente, se considera a la unidad funcionando a un valor promedio de 65 MW.

Precio nacional c/galón Bunker C: 7.00 sucres

BUNKER C

<u>Cantidad Consumida</u>	<u>Valor</u>
4480.5 $\frac{\text{galones}}{\text{hora}}$	31.363.5 sucres/hora
37'098.537,44 $\frac{\text{galones}}{\text{año}}$	259'689.762,10 sucres/año

Precio nacional c/m<sup>3</sup> Gas Natural: 1.55 sucres

GAS NATURAL

<u>Cantidad que consumiría</u>	<u>Valor</u>
20101.17 m <sup>3</sup> /hr	31.156.81 sucres/hora
166'437.687,6 m <sup>3</sup> /año	257'978.415,80 sucres/año

AHORRO

Valor anual Bunker C	Valor anual Gas Natural =
259'689.762,10 $\frac{\text{sucres}}{\text{año}}$	257'978.415,80 $\frac{\text{sucres}}{\text{año}}$ =

Ahorro anual = 1'711.346,30 sucres/año  
= 51.858,98 dólares/año

lo cual representa el 0.66% anual de ahorro.

DETERMINACION DEL AHORRO QUE REPRESENTA PARA EL PAIS EL  
GENERAR ELECTRICIDAD CON GAS NATURAL EN VEZ DE BUNKER C,  
EN EL MERCADO INTERNACIONAL.

Considerando el funcionamiento de la unidad a un valor promedio de 65 MW.

Precio internacional c/galón Bunker: 30.95 sucres

BUNKER C

<u>Cantidad a venderse</u>	<u>Valor a obtenerse</u>
4480,5 $\frac{\text{galones}}{\text{hora}}$	138.671,48 sucres/hora
37'098.537.44 $\frac{\text{galones}}{\text{año}}$	1.148'199.734 sucres/año

Precio internacional c/m<sup>3</sup> gas natural: 6.85 sucres

GAS NATURAL

<u>Cantidad a venderse</u>	<u>Valor a obtenerse</u>
20101.17 m <sup>3</sup> /hr	137.693 sucres/hora
166'437.687.6 m <sup>3</sup> /año	1.140'098.160 sucres/año

AHORRO POR USAR GAS NATURAL EN VEZ DE BUNKER, Y ESTE  
VENDERLO AL MERCADO INTERNACIONAL

Valor anual a obtenerse con Bunker C — Valor anual a obtenerse con gas natural =  
1.148'199.734 sucres/año - 1.140'098.160 sucres/año =  
Ahorro anual al país = 8'101.574 sucres/año  
245.502.24 dólares/año

lo cual representa el 0.71% de ahorro anual al país.

De los resultados obtenidos en los cálculos realizados se tienen los valores anuales que para el caso del uso de Gas Natural representan ahorros tanto a nivel nacional como internacional.

Es necesario recordar que este ahorro se desprende del balance de materia y energía hecho en la sección 5.2 para distintas generaciones, dicho balance se lo hizo considerando solamente 2 tipos de ahorro de vapor que se obtienen al usar este nuevo combustible, como tampoco para atomizarlo. Pero no se consideró el ahorro de vapor que se obtiene al no calentar con vapor las lí-neas de combustible, como en el caso del Bunker, el cual es recibido en el muelle a una distancia considerable de la planta, ni tampoco usar vapor para calentar el combustible en los tanques, ni en los sopladores de hollín, lo cual significa que el valor del ahorro de va-por es mucho mayor al usar Gas Natural como combustible en lugar del Bunker C, por tanto ésto significa que los valores obtenidos en los anteriores cálculos estén bien respaldados.

Se observa que a nivel nacional, este ahorro representa

una cantidad considerable para INECEL, que dejaría de sufragar para la generación de electricidad. Mientras que a nivel internacional, el uso de Gas Natural representa un ahorro mucho más significativo. Todo lo cual, es indicio que la inversión que se realizaría para implementar el nuevo sistema de combustible es posible financiarla con estos valores de ahorros obtenidos.

En la próxima sección se considerará el valor que se obtendrá al hacer la instalación de este nuevo sistema de combustible, y se verá la factibilidad de su realización considerando la financiación de la misma por parte de INECEL, contando con los ahorros obtenidos, sin recurrir a tomar otros valores para su pago.

### 6.3. FACTIBILIDAD DE INSTALACION DEL SISTEMA ALTERNO

De lo analizado en las anteriores secciones de este capítulo se establece que la instalación del nuevo sistema de combustible con Gas Natural constituye un gran avance tanto técnico como económico. En ésta sección se va a determinar el costo total que demandaría la instalación de este nuevo sistema incluyendo el costo de materiales, mano de obra y puesta en marcha, para lo cual,

de acuerdo al plano de la fig. 4.3 y la lista de materiales como tuberías, válvulas, elementos de control y regulación, se ha procedido a obtener su valor en el mercado nacional, con el objeto de establecer el costo total de la obra.

Con el valor total y considerando el ahorro anual a nivel nacional obtenido en la sección 6.2, se procederá mediante fórmulas de interés compuesto a obtener los valores de amortización del valor total para lo cual se probará con valores tentativos de años y conociendo que los intereses cobrados en estos casos son del orden del 8 %.

COSTO TOTAL DEL NUEVO SISTEMA DE COMBUSTIBLE CON  
GAS NATURAL

SISTEMA DE REGULACION Y CONTROL

CANTIDAD	NOMBRE EQUIPO	RANGO TRABAJO	VALOR UNITARIO (Suces)	VALOR TOTAL (Suces)
1	Regulador Presión	(800-40) psig	50.000	50.000
3	Indicador presión	(0-5) Kg/cm <sup>2</sup> g	500	1.500
2	Transmisor presión	(0 - 5) Kg/cm <sup>2</sup> g	800	1.600
1	Interruptor presión	(0 - 5) Kg/cm <sup>2</sup> g	600	600
1	Flujometro	6"	1.000	1.000
1	Orificio	8"	4.000	4.000
2	Reductor o expansor	10" - 8"	3.000	6.000
1	Reductor o expansor	8" - 6"	2.500	2.500
1	Válvula seguridad	8"	4.000	4.000
1	Válvula operada por aire	8"	1.500	1.500
1	Válvula operada por aire	6"	1.300	1.300
1	Válvula solenoide de corte	10"	15.000	15.000
1	Válvula de carga	10"	10.000	10.000
1	Válvula de control	8"	10.000	10.000
3	Válvulas GLOBO	10"	4.000	12.000
20	Válvulas GLOBO	1"	200	4.000
1	Válvula GLOBO	6"	800	800
				1'258.000

SISTEMA DE QUEMADORES

CANTIDAD	NOMBRE EQUIPO	RANGO TRABAJO	VALOR UNITARIO (Suces)	VALOR TOTAL (Suces)
6	Fotocelda-retraso tiempo	4000°C	80.000	480.000
6	Quemadores	40000 $\frac{\text{Kcal}}{\text{hr m}^3}$	600.000	3'600.000
6	Expansores	4" - 5"	1.200	7.200
6	Tubería flexible	5"	400	2.400
6	Indicador presión	0 - 5 Kg/cm <sup>2</sup> g	500	3.000
6	Orificio	4"	2.500	15.000
6	Válvula compuerta	4"	600	3.600
6	Válvula compuerta	5"	700	4.200
6	Válvula solenoide corte	4"	6.000	36.000
6	Válvula Globo	1"	200	1.200
				<u>4'152.600</u>

TUBERIA

# TUBOS	LONGITUD (m)	DIAMETRO (pulg)	CARACTERISTICAS	VALOR UNIT. TUBO	VALOR TOTAL
21	120	8"	Acero sin costura	22.000	462.000
5	30	10"	ASTM-106	30.000	150.000
2	10	6"	Cedula - 40	11.350	22.700
2	12	5"	Tubos de 6 m. bi celado los extre mos.	9.250	18.540
2	12	4"		6.210	12.420
4	22	1 1/2"		2.500	10.000
7	40	1"		1.700	11.900
					<u>687.560</u>

COSTO TOTAL DE EQUIPOS Y MATERIALES PARA IMPLEMENTAR ELNUEVO SISTEMA DE COMBUSTIBLE

Sistema regulación y control	1'258,000
Sistema quemadores	4'752,600
Tubería	<u>687,560</u>
	S/, 6'098,160
Mano de obra, pruebas y puesta en marcha (y varios)	<u>2'000,000</u>
VALOR TOTAL	S/, 8'098,160

FINANCIACION DEL NUEVO SISTEMA DE COMBUSTIBLE CON GAS  
NATURAL

El costo total de la instalación es de:

S/. 8'098.160,00 (sucres)

El ahorro total a nivel nacional en combustible, es de:

S/. 1'711.346,30 (un millón setecientos once mil  
con trescientos cuarenta y seis  
sucres, 30/100)

El interés anual a pagarse en estos casos es del orden del 8%.

Usando la fórmula de interés compuesto, se obtiene el valor anual que servirá para amortizar el costo total de la instalación:

$$A = C \frac{i (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

A: amortización (sucres/año)

C: costo total obra (sucres)

i: interés (%0

n: tiempo (años)

donde:

$$i = 0.08$$

$$n = 7 \text{ años}$$

$$c = \text{S/} . 8'098.160$$

entonces:

$$A = 8'098'160 \times \frac{0.08 (1 + 0.08)^7}{(1 + 0.08) - 1}$$

$$A = 1'555.433,04 \frac{\text{sucres}}{\text{año}}$$

pagando de esta forma el costo total de la obra se obtienen:

$$\text{S/} . 1'091.392,82 \text{ sucres}$$

del valor restante en los siete años que dura el pago.

#### DEPRECIACION DE LA INSTALACION

$$D = C \times P_d$$

D: depreciación ( $\frac{\text{sucres}}{\text{año}}$ )

C: costo total obra (sucres)

$P_d$ : porcentaje anual de depreciación (%)

El valor de  $P_d$  para este tipo de instalación según tablas de porcentaje de depreciación son de alrededor del

1.1%, la depreciación anual será de:

$$D = 8'098.160,00 \times 0.011$$

$$D = 89.079,76 \text{ sucres/año}$$

En los 7 años que se pagará la instalación se habrá depreciado en S/. 534.478,56 (sucres) por lo que el valor de la instalación para luego de ese tiempo será de:

$$C = S/. 7'563.681,44 \text{ (sucres)}$$

De los cálculos realizados para la financiación del nuevo sistema de combustible con Gas Natural se aprecia que es perfectamente factible su implementación, y su forma de pago permite en forma pausada y descansada ir efectuando los abonos con sólo el ahorro de combustible expuesto en el balance de materia y energía de la sección 5.2.

Por lo tanto se ha podido establecer que tanto desde el punto de vista técnico, económico y de financiamiento el presente proyecto es altamente provechoso llevarlo a la práctica.

También se aprecia que el valor de la depreciación al cabo de los años de pago no es significativa y no afecta a la vida útil de la instalación.

Desde el punto de vista del ahorro a nivel internacional establecido en la anterior sección es altamente - rentable para el país la instalación de este nuevo sistema ya que ello permitiría destinar esos fondos obtenidos en ese ahorro a otras obras de urgencia para el país, el cual es bastante alto. Todos esos cálculos - han sido realizados para una unidad, si se tiene en cuenta que son dos unidades el valor del ahorro se multiplica por dos y es mucho más significativo.

## SINTESIS DEL ESTUDIO

En esta sección se va a tratar de dar una imagen global del proyecto en sí procurando simplificar en lo posible las distintas ideas y dando un criterio final respecto a ellas.

Esta tesis se fundamenta básicamente en el concepto de combustión, particularizando para el Gas Natural, con este fin se elaboró el temario ya conocido.

En el Capítulo 1 se encuentra una introducción al tema, y en el que se da las razones, ventajas y desventajas que impulsaron al autor a trabajar en su desarrollo. Muchas de ellas sin duda alguna encuentran su justificación como ya se ha dicho.

Luego en el capítulo dos, se procura tener las bases necesarias fundamentado en el análisis químico del combustible ya sea gravimétrico (Bunker C y Diesel) y volumétrico (Gas Natural), dando los criterios elementales de combustión que sean necesarios tener presentes, para la posterior labor. Por ser el Bunker C, el combustible de

mayor uso en la planta, los cálculos de combustión, tales como aire requerido para su efecto, productos, punto de rocío, se justifican plenamente ya que es el combustible que va a servir de punto de comparación respecto del Gas Natural, todo lo cual no sucede con el Diesel, razón por la cual los cálculos de combustión no se los ha realizado con este último combustible.

En el capítulo III, se hace una revisión del equipo que constituye el sistema que se tiene para llevar a efecto la combustión, al igual que el anterior capítulo se halla bien ilustrado con figuras que muestran una idea bastante completa del equipo.

También se analiza como se realiza el proceso de combustión, los productos de combustión y su evacuación mediante los sopladores de hollín, así como el mantenimiento del equipo y su limpieza. Se analiza el efecto del azufre en la composición química del combustible y su posterior repercusión, además que se pone en claro los procedimientos de operación del sistema de combustión, lo cual son normas generales válidas para todos los combustibles, en muchos aspectos.

Observando el capítulo cuatro, tema central de esta tesis, se aprecia una breve reseña del Gas Natural desde su fuente de origen hasta su llegada a la planta, basado en datos proporcionados por CEPE (Corporación Estatal Petrolera Ecuatoriana), con lo cual se indican las condiciones del combustible disponible para su uso. Seguidamente se analiza el funcionamiento del sistema de combustión, tratando de establecer las diferencias respecto al combustible anterior, con las cuales se confirman las ventajas que se obtienen al usar Gas Natural como combustible como ya se ha visto y se revisará posteriormente. A continuación se analiza el sistema de combustible mediante el nuevo fluido, su estructuración, sistema de quemadores para lo cual se recurre al manual de combustión de la Industrial Press Inc., y se realiza una de las partes más importantes de esta tesis como es el diseño del sistema de quemadores, analizando las condiciones de entrada y salida por el quemador, de acuerdo a uno elegido del citado manual, cuya elección fue hecha en base a las características de las que dispone actualmente la planta para llevar a efecto dicha implementación, también de el funcionamiento del sistema de registros de aire y el proceso de combustión en sí, luego los diferentes equipos de regulación y control de combustión y evacuación de los mismos.

En el capítulo cinco, se hace una recopilación de datos dados por el fabricante para el sistema de combustión - y sus equipos, además de balances de materia y energía con los cuales se establece la cantidad de combustible ahorrado usando el Gas Natural como combustible, también se calcula las eficiencias que se obtienen al generar potencia tanto con el Bunker C como con el Gas Natural.

En el capítulo seis, se hace un análisis de los diversos factores técnicos y económicos que animan a decir que la implementación de este estudio es beneficiosa, lo cual es corroborado con el análisis de costos que se hace en la última parte y en el que se deja ver la facilidad de su financiación solamente con el combustible ahorrado.

#### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Partiendo del criterio básico de combustión, y en particular del Gas Natural, se concluye que para el caso de la Central Estero Salado, su llevada a efecto presenta razones muy convenientes y beneficiosas aunque también tiene sus desventajas, las cuales pueden ser superadas, por lo que es motivo suficiente para un estudio de los parámetros de funcionamiento de los diferentes e

quijos de combustión.

El objetivo impuesto al iniciar esta tesis, fue el de es  
tablecer la factibilidad de la instalación de un nuevo -  
sistema de combustible, tal es el Gas Natural del Golfo  
de Guayaquil, avisorando su próxima puesta en producción,  
objetivo que como se ha visto ha sido cumplido a cabali  
dad.

Las ventajas económicas, operativas y de mantenimiento -  
son extraordinarias, así al comparar la fig. 5.19 y 4.3,  
en el que se aprecian los diagramas de los sistemas de  
combustible para ambos fluídos, se observa a simple vis  
ta cuan complicado es el primero y cuan simplificado es  
el segundo, lo cual evidencia de por sí el simple sistem  
a de combustión que se necesita para quemar el Gas Na-  
tural, simplicidad que significa facilidad de operación  
ya sea al arrancar desde el estado frío no se necesita  
Diesel, no se necesita precalentar el combustible ni tamm  
poco bombearlo; solamente el prescindir del Diesel signif  
ica un ahorro económico de combustible el cual es bas-  
tante alto, no se necesita equipo para llevar a efecto  
su combustión, todo lo cual es ventaja técnica (opera-  
ción y mantenimiento) y económica (ahorro de combustible  
y el correspondiente equipo).

Además el Gas Natural no necesita reservorio de almacenamiento, mientras que con los otros combustibles es indispensable, aparte que hay que disponer del equipo necesario para bombearlo en cada tanque de almacenamiento, equipo para calentarlo y vapor auxiliar para llevarlo a efecto. Al Bunker C además es necesario calentarlo desde su misma llegada en el muelle, a lo largo de las tuberías que conducen a los reservorios, en ellos mismos, y previa a su entrada al quemador es necesario elevar su temperatura hasta los 100°C, finalmente para entrar al hogar es necesario mezclarlo con vapor de atomización, todo lo cual constituye un gran desembolso económico, además de la presencia del equipo necesario, a la manipulación y operación y constante cuidado de mantener filtros de combustible en buen estado de limpieza, toberas de atomización y quemadores a más del equipo restante, lo cual en el caso del Gas Natural constituye una gran ventaja como ya se dijo económica, de operación y mantenimiento.

Es necesario también mencionar la extraordinaria ventaja que se obtiene al quemar Gas Natural, respecto a los productos de combustión, ya por la cantidad en volumen que es menor respecto al otro combustible como a la pureza de su composición, lo cual implica que no hay peligro en deterioración por corrosión de los equipos de combustión.

Así, en la tabla 2.11 se aprecia la composición gravimétrica de ambos combustibles, observándose que el azufre se halla presente en el Bunker C, mientras que no lo está para el Gas Natural, lo cual de por sí constituye una excelente ventaja para cualquier equipo de combustión.

Aquí, cabe mencionar la desventaja que presenta este nuevo combustible, y reside en su gran contenido de hidrógeno como se aprecia en la mencionada tabla, lo cual implica que mayor calor latente de vaporización se vaya en los gases de combustión que escapan a la atmósfera, desventaja que como ya se dijo puede ser superada, ya que la pureza del combustible lo permite, esto es, bajando la temperatura de salida de los gases de combustión, lo cual necesariamente afectaría a todo el sistema de combustión, por lo que es motivo suficiente para un nuevo estudio, en el que se establecerían los nuevos parámetros de funcionamiento de los equipos de combustión, a fin de aprovechar en lo máximo posible la salida de los gases de combustión, aumentando la eficiencia del sistema, que como se aprecia en las tablas 5.5B y 5.5.GN, en el caso del Gas Natural es visiblemente inferior a la del Bunker C, debido precisamente a este factor que se ha mencionado, ya que los cálculos de eficiencia han si

do elaborados en el caso de ambos combustibles para las mismas condiciones de funcionamiento.

Como otra de las ventajas que posee el Gas Natural al utilizarse como combustible es su gran flexibilidad que permite al personal de operación de la planta, hacer frente en cualquier momento a un potencial rechazo de carga que siempre está presente, ya que debido a su naturaleza misma, el combustible se presta mucho más fácilmente que el Bunker C, para el control automático a distancia, subordinándose dócilmente a las maniobras que se hagan para normalizar el funcionamiento del sistema en un caso como éste. Esta ventaja es excelente, ya que si se considera de que esto no fuese así, tal como sucede con el Bunker C, la unidad tendría que forzosamente salir de línea, lo cual representa un perjuicio económico al Instituto ya que se deja de generar energía eléctrica que estaba disponible al consumidor, con las consiguientes molestias, a más del intenso y arduo trabajo a que se ve sometido el personal operativo, salvando cualquier complicación que obligue a un tiempo mayor en que la unidad esté fuera de línea y el consiguiente gasto en Diesel para arrancar desde el estado frío.

El equipo de combustión utilizable para quemar Gas Na-

tural, si bien es cierto, que es mucho más simplificado que para el Bunker C, debe estar previsto como se ha visto de amplias seguridades, ya que por la naturaleza misma de su composición, la acumulación de combustible sin quemar en el hogar o cualquier otro lugar sometido al calentamiento constituye un potencial peligro de explosión, por lo cual se deberán respetar las normas de seguridad exigidas cuando se use este combustible y el personal de operación debe estar perfectamente entrenado observando gran sentido de responsabilidad y eficiencia.

Para el diseño del equipo para quemar Gas Natural se han consultado varias obras, que se hallan en el Apéndice C, y se han elaborado rangos de funcionamiento de los quemadores, tanto de presión como de temperatura, así como de velocidad, estableciendo los máximos valores a los cuales puede llegar a funcionar el quemador como se aprecia en los gráficos A.4 y A.5, en el que se establece los parámetros y condiciones de funcionamiento para el Gas Natural, se han asumido medidas dando resultados satisfactorios, de acuerdo a lo consultado, medidas que podrán ser variadas basándose en las circunstancias de instalación, además de acuer-

do al fabricante se elaboró el diagrama de combustible para el Gas Natural (fig. 4.3) así como las características de presión y temperatura de trabajo.

Por otro lado y en base al ahorro de vapor que se consigue al usar el Gas Natural como combustible, se ha visto la factibilidad de la instalación del nuevo sistema, para lo cual se ha establecido el costo de la instalación, tratando de exagerar los precios y de esta manera aumentar el tiempo de validés de este estudio, además de su posibilidad de financiamiento.

Se ha visto que es posible instalar el nuevo sistema de combustible con Gas Natural, utilizándose para su pago el ahorro de combustible obtenido del balance de materia y energía por ahorro de vapor, y pagarlo en siete años sin recurrir a ninguna fuente exterior de financiación.

De esta manera se ha querido dar un paso más en el largo camino del mejor aprovechamiento de la energía.

# A P E N D I C E

## A. PLANOS Y GRAFICOS

Gráfico A.1: GENERACION Vs. CONSUMO GAS NATURAL

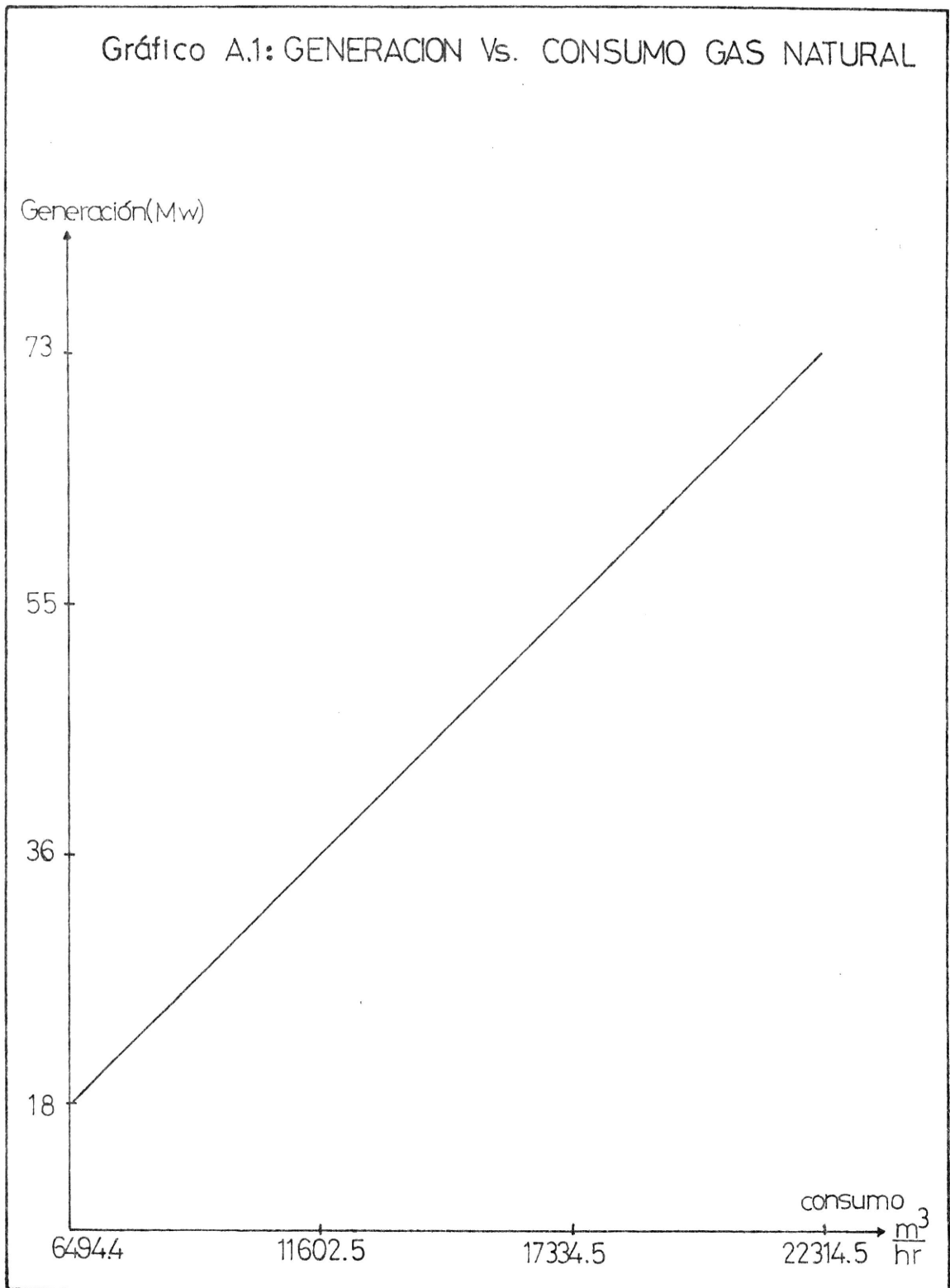


Gráfico A.2:  
CONDICION DE OPERACION RECOMENDADA PARA  
LA CALDERA

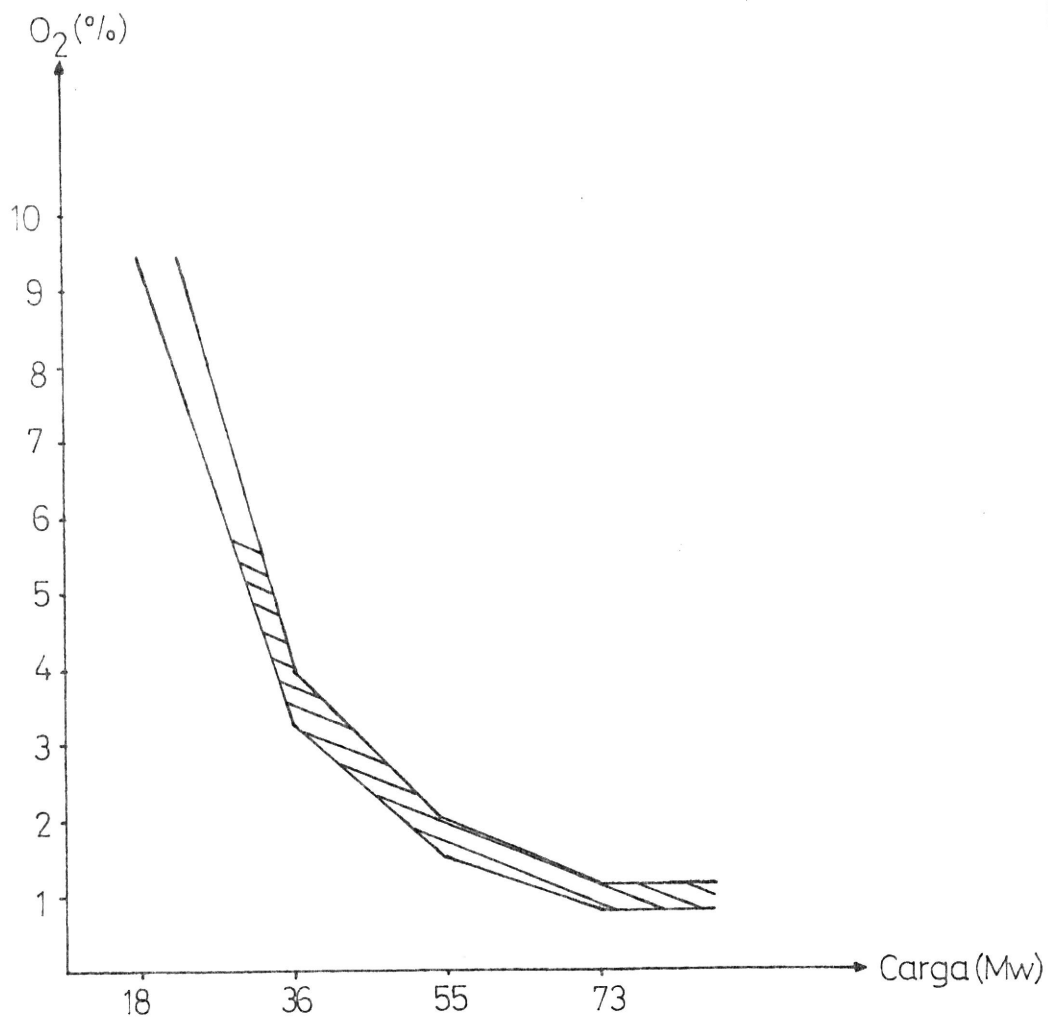
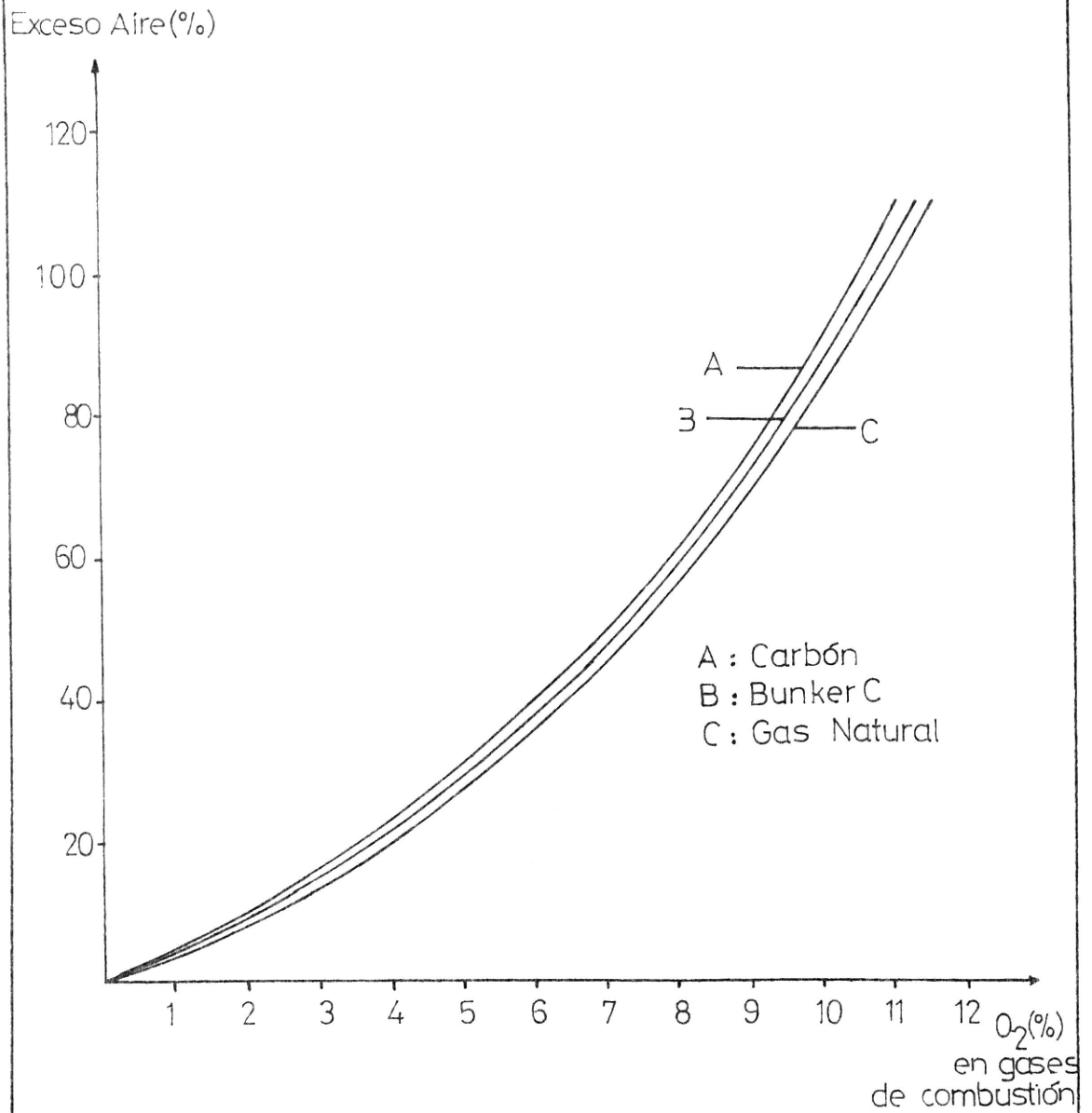
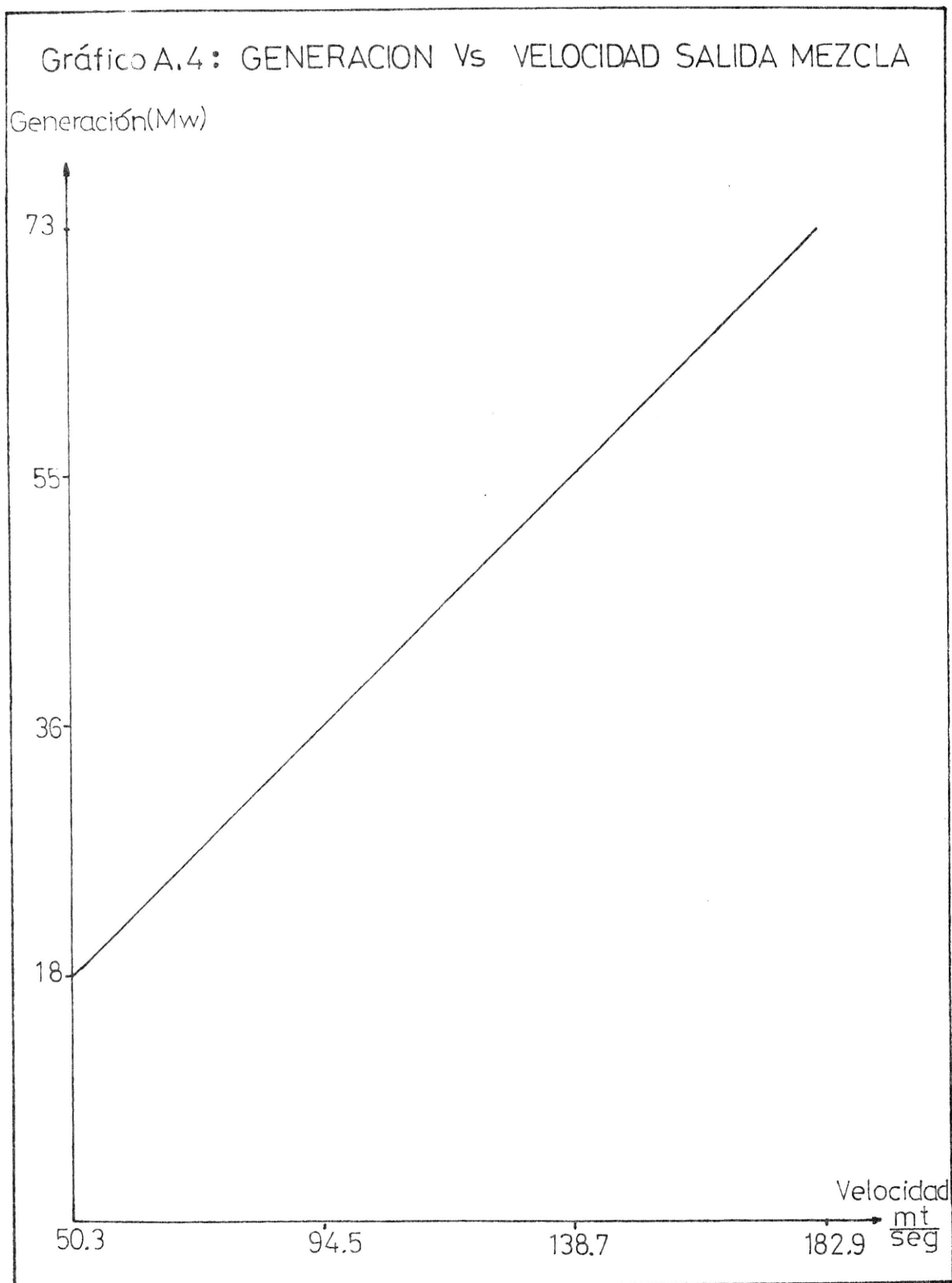
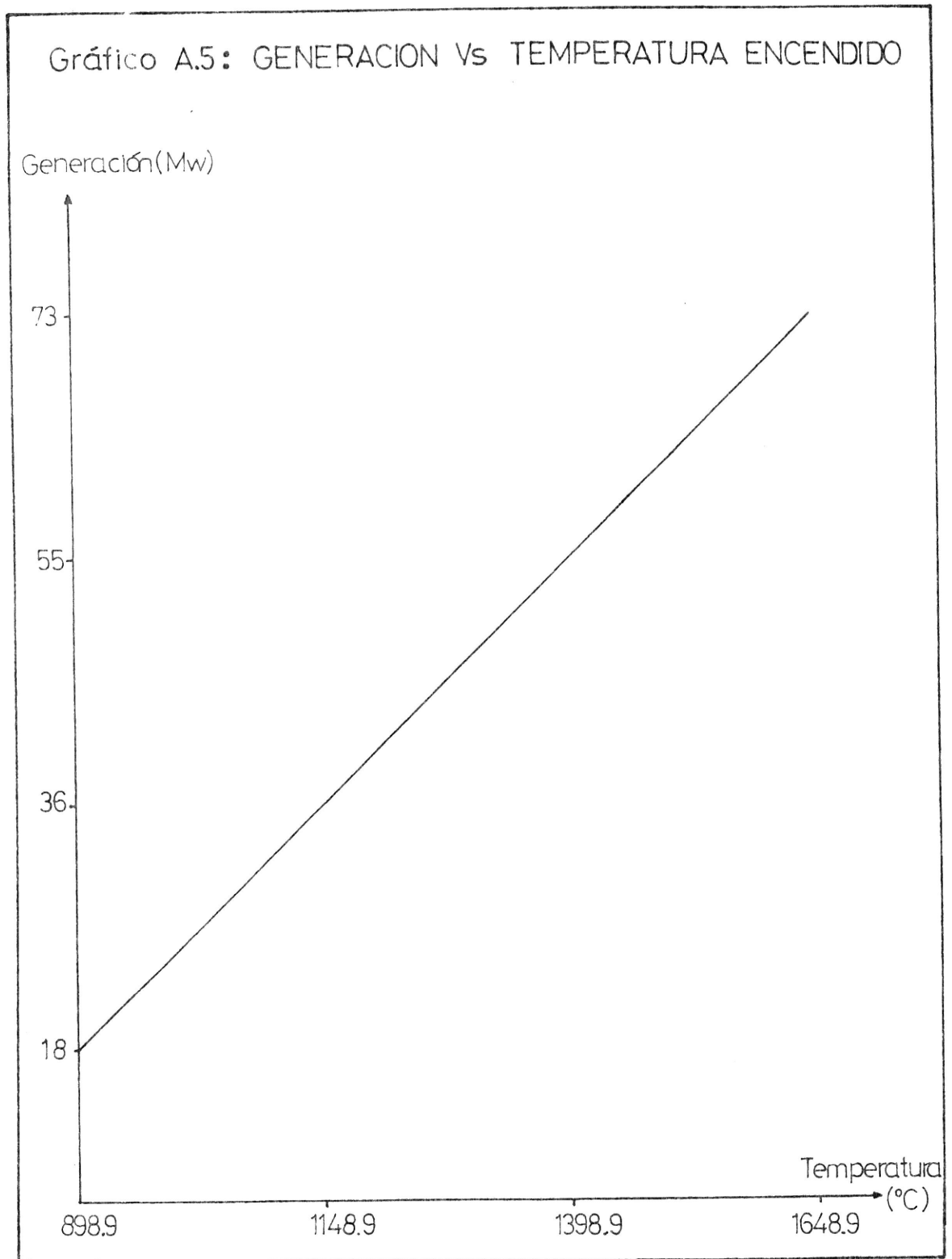


Gráfico A.3: RELACION OXIGENO Vs EXCESO DE AIRE







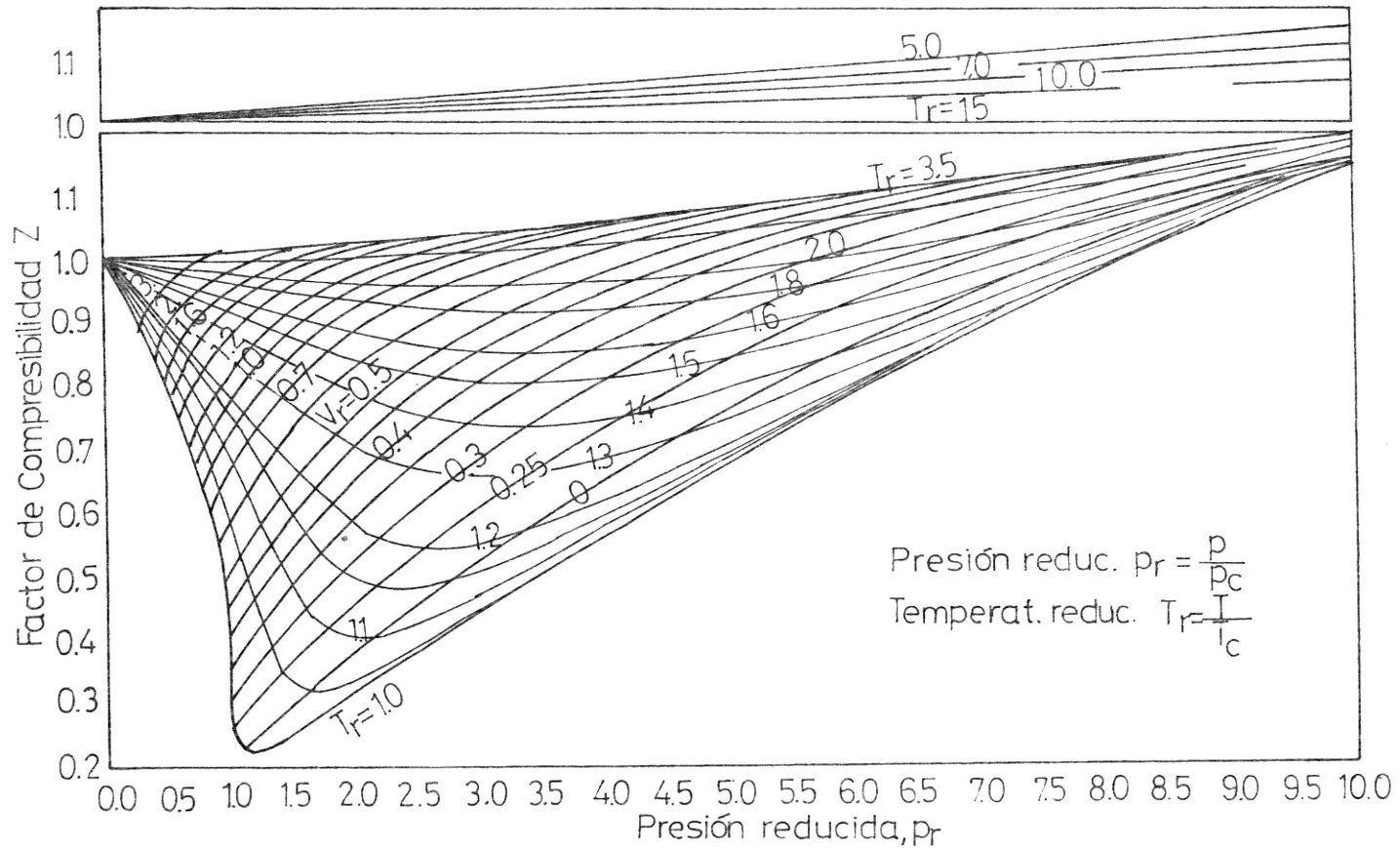


Gráfico A.6: DIAGRAMA DE COMPRESIBILIDAD DE NELSON Y OBERT

## B. T A B L A S

TABLA B.1. CONSTANTES DE COMBUSTION Y PROPIEDADES FISICAS DE SUSTANCIAS COMBUSTIBLES  
SOSTENEDORES DE COMBUSTION, Y GASES COMBUSTIONADOS

Nº	SUSTANCIA	FORMULA	A DENSIDAD Kg/m <sup>3</sup>	B VOLUMEN ESPECIFICO m <sup>3</sup> /Kg	C TEMPERATURA FLAMA EN AIRE °C
2	Carbón	C	1.0699	0.93467	----
4	Monóxido de carbono	CO	11.8597	0.08432	2468.3
5	Hidrógeno	H <sub>2</sub>	0.08522	11.73433	2210
6	Metano	CH <sub>4</sub>	0.67948	1.47171	1917.78
7	Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1.28608	0.77756	1948.89
8	Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.91575	0.52199	1967.2
9	Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2.53404	0.39463	1972.78
10	Iso-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2.53404	0.39403	1972.78
11	n-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	3.04982	0.32789	----
12	Iso-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	3.04982	0.32789	----
14	n-Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	3.64248	0.27454	----
15	Neo-Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	3.64248	0.27454	----
16	n-Heptano	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	----	----	----
17	Triptano	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	----	----	----
18	n-Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	----	----	----
19	Iso-Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	----	----	----
20	Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.19430	0.83731	2343.3
21	Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1.77799	0.56243	2254,4
22	Butileno	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	2.37066	0.42182	2221,1
23	Iso-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	2.37066	0.42182	----
24	n-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	2.96652	0.33710	----
25	Benzina	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	3.29928	0.30305	2269,56
26	Tolueno	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	3.89396	0.25681	2232,2
27	Xileno	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	4.48983	0.22273	----
28	Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1.11661	0.89557	2632,2

TABLA B.1 (Cont.)

Nº	SUBSTANCIA	FORMULA	A DENSIDAD Kg/m <sup>3</sup>	B VOLUMEN ESPECIFICO m <sup>3</sup> /Kg	C TEMPERATURA FLAMA EN AIRE °C
29	Naftalina	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	5.42047	0.18449	2260
30	Alcohol Metílico	CH <sub>3</sub> OH	1.35512	0.73794	-----
31	Alcohol Etílico	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	1.94778	0.51341	-----
32	Amoniaco	NH <sub>3</sub>	0.73042	1.36908	-----
33	Sulfuro	S	-----	-----	-----
34	Hidrógeno	H <sub>2</sub> S	1.45907	0.68537	-----
35	Fomaldehído	HCHO	-----	-----	-----
36	Acido Fórmico	HCOOH	1217,36	0.00082	-----
37	Acetaldehído	CH <sub>3</sub> CHO	781,68	0.00128	-----
38	Oxido nítrico	NO	1.25260	0.79834	-----
	Oxígeno	O <sub>2</sub>	1.35528	0.73785	-----
	Nitrógeno	N <sub>2</sub>	1.19157	0.83923	-----
	Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1.8741	0.53359	-----
	Dióxido de sulfuro	SO <sub>2</sub>	2.77591	0.36024	-----
	Vapor de agua	H <sub>2</sub> O	0.76213	1.31211	-----
	Aire	O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> +	1.22617	0.81555	-----

TABLA B.2. CALOR DE COMBUSTION

Nº	SUBSTANCIA	FORMULA	Kcal por m <sup>3</sup>		Kcal por Kg	
1	Carbón	C	---	---	7829	7829
2	Hidrógeno	H <sub>2</sub>	2890	2445	33942	28679
3	Oxígeno	O <sub>2</sub>	---	---	---	---
4	Nitrógeno (atm)	N <sub>2</sub>	---	---	---	---
5	Monóxido de carbono	CO	2854	2854	2415	2415
6	Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	---	---	---	---
7	Metano	CH <sub>4</sub>	8999	8101	13264	11942
8	Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	15766	14423	12402	11343
9	Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	22444	20648	12038	11076
10	n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	29087	26837	11845	10932
11	Iso-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	28998	26757	11817	10904
12	n-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	35747	33053	11719	10837
13	Iso-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	35667	32973	11693	10811
14	Neopentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	35516	32830	11654	10772
15	n-Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	42398	39260	11648	10786
16	Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	14263	13365	12020	11264
17	Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	20808	19456	11693	10937
18	n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	17424	25654	11586	10829
19	Iso-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	27290	25503	11521	10764
20	n-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	34120	31879	11511	10755
21	Benzina	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	33364	32021	10102	9695
22	Tolueno	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	39891	38104	10278	9818
23	Xileno	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	46507	44284	10361	9867

TABLA B.2 (Continuación)

Nº	SUBSTANCIA	FORMULA	Kcal por m <sup>3</sup>		Kcal por Kg	
24	Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	13134	12680	11946	11538
25	Naftalina	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	52056	50277	9613	9282
26	Alcohol metílico	CH <sub>3</sub> OH	7719	6820	5699	5037
27	Alcohol etílico	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	14228	12885	7312	6621
28	Amonia	NH <sub>3</sub>	3922	3237	5371	4436
29	Sulfuro	S	-	-	2211	2211
30	Hidrógeno	H <sub>2</sub> S	5744	5291	3943	3632
31	Dióxido de sulfuro	SO <sub>2</sub>	-	-	-	-
32	Vapor de agua	H <sub>2</sub> O	-	-	-	-
33	Aire		-	-	-	-

TABLA B.3. CALOR ESPECIFICO, PUNTO DE EBULLICION Y CALOR LATENTE DE VAPORIZACION DE  
VARIOS GASES Y LIQUIDOS

Nº	GAS O LIQUIDO	Kcal/Kg°C			
		C <sub>p</sub>	Gas C <sub>v</sub>	K = C <sub>p</sub> /C <sub>v</sub>	Líquido C <sub>p</sub>
2	Carbon	0.2000	----	----	----
4	Monóxido de carbono	0.2484	0.1779	1.395	----
5	Hidrógeno	3.4460	2.443	1.412	----
6	Metano	0.526	0.400	1.315	----
7	Etano	.409	.347	1.18	0.78
8	Propano	.388	.343	1.13	.58
9	n-Butano	.397	.361	1.10	.55
10	iso-Butano	.387	.348	1.11	.56
11	n-Pentano	.3974	.3699	1.07	.557
12	iso-Pentano	.388	.3605	1.076	.562
13	Neopentano	.391	.3635	1.076	.543
14	n-Hexano	.3984	.3753	1.062	.536
15	Neohexano	.3984	.3753	1.062	.511
16	n-Heptano	.3992	.3794	1.052	.525
17	Triptano	.3992	.3794	1.052	.497
18	n-Octano	.3998	.3824	1.046	.526
19	iso-Octano	.3998	.3824	1.046	.489
20	Etileno	.363	.296	1.22	---
21	Propileno	.363	.316	1.15	.57
22	Butileno	.371	.334	1.11	.53
23	Iso-Butano	.375	.335	1.12	.55
24	n-Pentano	.380	.352	1.08	---

TABLA B.3 (Cont.)

Nº	GAS O LIQUIDO	C <sub>p</sub>	Gas C <sub>v</sub>	K = C <sub>p</sub> /C <sub>v</sub>	Kcal/Kg°C Líquido C <sub>p</sub>
25	Benzina	.342	.317	1.08	.410
26	Tolueno	.347	.346	1.06	.404
27	p-Xileno	...	...	...	0.407
28	Acetileno	.689	.547	1.26	...
29	Naptalina	.325	...	...	64.1
30	Alcohol Metílico	.701	.583	1.203	...
31	Alcohol Elítico	.731	.646	1.13	...
32	Amoniaco	.940	.718	1.310	...
33	Sulfuro	.190	...	...	16.9
34	Hidrógeno	.456	.345	1.32	...
36	Acido formico	...	...	...	...
37	Acetaldehído	...	...	1.14	...
38	Oxido nítrico	.419	.2995	1.40	...
39	Nitrógeno	...	...	...	...
40	Oxígeno	.219	.1565	1.397	...
41	Dióxido de carbono	.1989	.1535	1.295	...
42	Dióxido de sulfuro	.273	.2115	1.29	...
43	Vapor de agua	.446	.334	1.335	...
44	Aire	.2397	0.1711	1.400	...
45	Nitrógeno tetróxido	.2485	...	...	...

TABLA B.4

DATOS DE OPERACION DE CALDERA

EQUIPO Y PARAMETROS	HORAS	UNIDAD # 2			UNIDAD # 3			
		UNIDAD	MAX.	MIN.	NORMAL	MAX.	MIN.	NORMAL
CARGA GENERADOR		MW	73	73	73	73	73	73
Presión descarga tiro forzado		mm H <sub>2</sub> O	555	535	545	550	518	533.3
Presión sello de aire		"	550	530	540	545	504	526.5
Presión aire entrada a calent. vapor		"						
Presión en caja de aire		"	440	410	433.2	440	402	421.8
Presión hogar de caldera		"	230	208	217	221	204	210.8
Presión aire ent. calent. Ljungström.		"	540	510	526.5	530	497	510
Presión aire sal. calent. Ljungström.		"	460	430	450.5	465	421	434.5
Presión aire sal. calent. vapor		"	-					513
Presión gases ent. calent. Ljungström		"	140	120	126.75	120	110	115.6
Presión gases sal. calent. Ljungström.		"	50	43	48.8	38	33	35
Temp. aire sal. calentador aire a vapor		°C	101	100	100.4	100	99	99.5
Temp. aire sal. calentador aire Ljungström.		"	363	346	357.4	352	350	350.8
Temp. gases ent. cal. aire Ljungström.		"	407	381	398	400	395	398

TABLA B.4 (Continuación)

EQUIPO Y PARAMETROS	HORAS	UNIDAD # 2			UNIDAD # 3			
		UNIDAD	MAX	MIN.	NORMAL	MAX.	MIN.	NORMAL
CARGA GENERADOR		MW	73	73	73	73	73	73
Temp. gases sal. cal. aire Ljungström.		"	170	163	168	172	170	170.4
Presión agua aliment. entrada caldera.		Kg/cm <sup>2</sup>	97.5	96	96.9	97.5	96	97
Presión domo		"	95.3	95	95	94.7	93.6	94.26
Presión vapor sal. sobre calentador.		"	91	90	90.5	90	88.2	89.2
Temp. agua aliment. entrada caldera.		°C	220	219	219.2	221	219	219.8
Temp. vapor después del des-sobrecalentamiento.		"	360	347	351.4	359	358	358.6
Temp. vapor principal sal. sobrecalent.		"	515	508	511.3	513	510	512
Presión desc. bomba combustible		Kg/cm <sup>2</sup>	-			20	19.8	20
Presión combustible en cabezal		"	11.5	11	11.33	10.9	10.5	10.7
Presión de vapor atomización		"	-	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
Temp. comb. entrada a calentador		"	53.5	49	51.8	54	52	52.8
Temp. comb. en quemadores		"	104	100	102.2	105	104	104.5
Oxígeno en gases de escape		%	1.6	0.7	1.1	1.2	1.0	1.07
Flujo aire de combustión		%	99	93	96	78.5	76.5	77.6
Lectura integrador combustible		lt.						

TABLA B.4 (Continuación)

EQUIPO Y PARAMETROS	HORAS	UNIDAD	UNIDAD # 2			UNIDAD # 3		
			MAX.	MIN.	NORMAL	MAX.	MIN.	NORMAL
CARGA GENERADOR		MW	73	73	73	73	73	73
Flujo agua de alimentación		t/h						
Flujo vapor principal		t/h						
Presión vapor al calent. de aire		Kg/cm <sup>2</sup>	10.8	9.3	10.3	13.5	13.3	13.36
Temp. vapor al calent. de aire		°C	298	288	290.9	285	280	282
Presión vapor aux. después válv. control.		Kg/cm <sup>2</sup>	10.6	10.6	10.6	10.8	10.8	10.8
Presión combust./Presión vapor atomización Quemador # 6		$\frac{\text{Kg/cm}^2}{\text{Kg/cm}^2}$	8.5/4.9	8.3/4.4	8.4/4.5	8.6/4.9	8.4/4.9	8.5/4.9
Presión combust./presión vapor atomización Quemador # 5		"	8.5/4.9	8.3/4.7	8.4/4.8	8.5/5.0	8.3/5.0	8.4/5.0
Presión combust./presión vapor atomización Quemador # 4		"	8.6/4.6	8.3/4.5	8.4/4.6	8.5/5.0	8.3/4.9	8.4/4.9
Presión combust./presión vapor atomización Quemador # 1		"	8.6/4.8	8.4/4.5	8.5/4.7	8.4/4.5	8.1/4.9	8.3/5
Presión combust./presión vapor atomización Quemador # 2		"	8.6/4.7	8.3/4.6	8.5/4.6	8.8/5.1	8.4/5	8.56/5
Presión combust./presión vapor atomización Quemador # 3		"	8.5/5	8.1/4.5	8.4/4.7	8.6/5.1	8.4/5	8.5/5

Nota: Para ilustración y comparación se tabulan los datos de la Unidad # 2, ya que para propósitos de esta tesis se han utilizado los datos de la Unidad # 3.

TABLA B.5

MAXIMA PRESION DE MEZCLA PARA VARIOS GASES (basado en un coeficiente de arrastre  $E = 2.0$  y coeficiente de conversión de velocidad  $C=0.9$ )

GAS NATURAL

	1	2	3
Kcal/m <sup>3</sup> , aproxim.	8.454	9.344	11123,75
Gravedad específica, G	0.60	0.62	0.65
Presión, P <sub>g</sub> , Kg/cm <sup>2</sup> g	2.11	2.11	2.11
Razón aire/gas, aproxim.	9/1	10/1	12/1
Gravedad específica mezcla	0.96	0.975	0.975
Aire arrastrado por el gas			
Máxima presión mezcla posible (E = 1 y C= 0.9) P <sub>m</sub> en mmH <sub>2</sub> O	118.11	101.6	74.68
Presión Mezcla, P <sub>m</sub> (C = 0.9, E desde la tabla B.6) mmH <sub>2</sub> O	63.5	55.88	40.64

TABLA B.6

COEFICIENTES PROMEDIO DE ARRASTRE, E

## AIRE ARRASTRADO POR GAS

CLASE DE GAS	RAZON AIRE/GAS	E	E <sup>2</sup>
Natural	10	0.74	.55
Propano	25	0.71	.5
Butano	---	---	---
Coke	4	.9	.81
Gas de agua	5	.85	.72

TABLA B.7

RAZON TIPICA DE AREA DE QUEMADOR AL AREA DE ORIFICIO PARA  
VARIOS GASES BAJO CONDICIONES ESTACIONARIAS

CLASE DE GAS	VALOR CALORIFICO Kcal/, TOTAL m <sup>3</sup>	RAZON AIRE/GAS APROXIMADA	RAZON APROX. DE AREA DE DESCARGA AL AREA ORIF.
Gas Natural			
Bajo	8.685,42	9.17	214
Medio	10.144,85	10.17	250
Alto	11.079,26	11,7	286
Propano	22.247,5	25	585
Butano-aire (mezcla)	6.674,25	6,8	65

## BIBLIOGRAFIA

1. AMERICAN GAS ASSOCIATION GAS ENGINEERS HANDBOOK ADVISORY COMMITTEE: "Gas Engineers Handbook". Ed. Industrial Press Inc. 200 Madison Avenue, New York, N.Y. 10016.
2. BENITO GIL F. "Fuel-Oil". Editorial BLUME. Rosario, 17, Madrid-5. Primera Edición, 1969.
3. BABCOCK - WILCOX: "Steam"
4. DAVIES CLIVE: "Calculations in Furnace Technology".
5. DEUTSCH Irving: "Tecnología del Gas".
6. DONALD SWIFT CHARLES: "Plantas de Vapor: Arranque, Pruebas y operación". McGraw Hill Book Company, Inc. New York.
7. GAFFERT G.A.: "Centrales de Vapor" Editorial Reverté, S. A., 1974-1975.
8. HATTAIX CLAUDIO: "Termodinámica Técnica y Máquinas Térmicas".
9. MARIÑO RAFAEL: "Producción y Transmisión industrial del calor". Editorial Dossat, S.A. Plaza de Santa Ana, 9, Madrid-1968.

10. MORING FAIRES VIRGIL: "Termodinámica" The Macmillan Co. Collier-Macmillan Canada, Ltd., Toronto, Ontario.
11. PEREZ PALACIO RAMIRO: "Ingeniería de Gas Natural" (Propiedades y comportamiento de fases).
12. REED RICHARD J.: "Combustion Handbook", North American Mfg. Co.; Cleveland, Ohio 44105 USA, Segunda Edición, 1978.
13. SALVY GIULIANO: "Combustión".
14. SEVERNS W.H., DEGLER H.E., y MILES J.C.: "La Producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases". Editorial Reverté, S.A., 1974-75.
15. RAUL LASCANO H: "Análisis de Plantas"